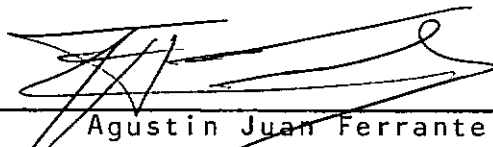


MODELO SIMPLIFICADO PARA ANÁLISE DE LANÇAMENTO DE  
ESTRUTURAS OFFSHORE TIPO JAQUETA

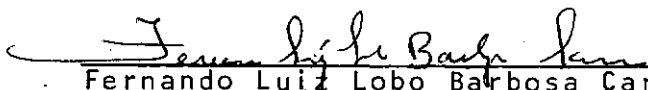
Sergio Guillermo Hormazábal Rodríguez

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS  
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovada por:



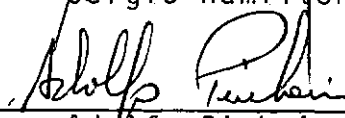
Agustin Juan Ferrante  
Presidente



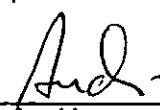
Fernando Luiz Lobo Barbosa Carneiro



Sergio Hamilton Sphaier



Adolfo Pinheiro



Andion



Toshi-Ichi Tachibana

RODRIGUEZ, SERGIO GUILLERMO H.

Modelo Simplificado para Análise de Lançamento de  
de Estruturas Offshore tipo Jaqueta (Rio de Janeiro)  
1982.

viii, p.93 29,7cm (COPPE-UFRJ, M.Sc., Engenharia  
Civil, 1982).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Fa  
culdade de Engenharia.

1. Modelo Simplificado I. COPPE/UFRJ II. Título  
(série).

## AGRADECIMENTOS

Aos Professores da COPPE/UFRJ pelos conhecimentos transmitidos, especialmente ao Prof. Agustin Juan Ferrante por sua orientação e estímulo constante durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos Engenheiros Sergio Mueller e Adolfo Pinheiro Andion pelo incentivo e apoio recebido para cursar o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Offshore.

A todos os colegas da PETROBRÁS pelo apoio e colaboração recebidos no decorrer das diversas etapas deste trabalho.

## RESUMO

Na análise de Instalação de Plataformas offshore Fixas, é usual estudar a fase de lançamento de estruturas do tipo jaqueta na parte final do projeto estrutural, cujo comportamento dinâmico tridimensional e com características não lineares, não está definido nas normas existentes.

Desta maneira na prática usual utiliza-se uma série de simplificações provenientes da experiência dos projetistas e dos ensaios com modelos reduzidos.

Como existe pouca literatura nesta matéria específica, é muito mais difícil ainda determinar a validade das simplificações feitas nas análises dos projetistas.

Desta maneira o objetivo do presente trabalho é apresentar uma teoria matemática baseada na 2ª lei de Newton (Conservação do momentum) e aplicá-la a um modelo simplificado, tendo desta forma atestado a validade da teoria e obtendo um modelo simplificado para analisar o lançamento na primeira etapa do projeto.

Como a equação obtida é uma equação diferencial de 1ª ordem, sua solução é determinada pelo método das diferenças finitas.

Finalmente são comparados os resultados obtidos por este método e os obtidos por outras teorias e programas atualmente utilizados, bem como com resultados experimentais de um caso típico de uma estrutura de jaqueta.

## SUMMARY

In the analysis of Fixed Offshore Platforms, usually the study of the launching process is performed on the final pass of the project.

The standards do not establish the conditions for this analysis. Thus the designer should proceed is based on his own experience and/or in model test results.

The bibliography is reduced to very few papers, and the simplifications introduced in some of them are not necessarily justified.

The main objective of the present work is to develop a mathematical theory based on 2<sup>nd</sup> Newton's law, and to implement a simplified model to test the theory and to provide a design tool to study a jacket launching in the first stage of the project.

The equation is a first order differential equation, and its solution is worked out by the finite differences.

Finally the results from the program developed, other computer programs, and model tests typical are compared, using data from a real case.

## ÍNDICE

I	- INTRODUÇÃO .....	1
1.1	- DETALHES PRELIMINARES .....	1
1.2	- OBJETIVOS DO TRABALHO .....	3
II	- ANÁLISE DO LANÇAMENTO DE JAQUETAS .....	5
II.1	- DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	5
II.2	- FASES DO LANÇAMENTO .....	7
II.2.1	- FASE 1 - POSIÇÃO DE LANÇAMENTO ....	7
II.2.2	- FASE 2 - DESLIZAMENTO DA JAQUETA ....	7
II.2.3	- FASE 3 - ROTAÇÃO DA ESTRUTURA ....	9
II.2.4	- FASE 4 - ROTAÇÃO DE DESLIZAMENTO ....	9
II.2.5	- FASE 5 - ENTRADA NA ÁGUA .....	9
II.3	- FORÇAS NO LANÇAMENTO .....	12
II.3.1	- IDENTIFICAÇÃO DAS FORÇAS .....	12
II.3.2	- ANÁLISE DESCRITIVA DAS FORÇAS .....	15
II.4	- HIPÓTESES E PARÂMETROS .....	18
II.4.1	- INTRODUÇÃO .....	18
II.4.2	- JAQUETA .....	18
II.4.3	- BARCAÇA .....	18
II.4.4	- ATRITO .....	19
III	- FORMULAÇÃO MATEMÁTICA .....	20
III.1	- INTRODUÇÃO .....	20
III.2	- EQUAÇÕES PARA A JAQUETA .....	22
III.3	- EQUAÇÕES PARA A BARCAÇA .....	26
III.4	- ANÁLISE PRÉVIA DAS EQUAÇÕES .....	28
IV	- FORMULAÇÃO MATEMÁTICA BIDIMENSIONAL .....	30
IV.1	- INTRODUÇÃO .....	30
IV.2	- MOVIMENTO PLANO .....	30
IV.3	- BARCAÇA FIXA .....	32
IV.3.1	- FASE 1 - POSIÇÃO DE LANÇAMENTO ....	32
IV.3.2	- FASE 2 - DESLIZAMENTO DA JAQUETA ....	32
IV.3.2.1	- EQUAÇÕES .....	32
IV.3.2.2	- CONDIÇÕES DE CONTORNO ....	35

IV.3.3	- FASE 3 - ROTAÇÃO NA VIGA EXTREMA ....	35
IV.3.3.1	- EQUAÇÕES .....	35
IV.3.3.2	- CONDIÇÕES DE CONTORNO ....	37
IV.3.4	- FASE 4 - ROTAÇÃO E DESLIZAMENTO ....	38
IV.3.4.1	- EQUAÇÕES .....	38
IV.3.4.2	- CONDIÇÕES DE CONTORNO ....	39
IV.3.5	- FASE 5 - ENTRADA NA ÁGUA .....	41
IV.3.5.1	- EQUAÇÕES .....	41
IV.3.5.2	- CONDIÇÕES DE CONTORNO ....	41
IV.4	- BARCAÇA MÓVEL .....	41
IV.4.1	- FASE 2 - DESLIZAMENTO DA JAQUETA ...	42
IV.4.1.1	- EQUAÇÕES .....	42
IV.4.1.2	- CONDIÇÕES DE CONTORNO ....	44
IV.4.2	- FASE 3 - ROTAÇÃO NA VIGA EXTREMA ....	45
IV.4.2.1	- EQUAÇÕES .....	45
IV.4.2.2	- CONDIÇÕES DE CONTORNO ....	46
IV.4.3	- FASE 4 - ROTAÇÃO E DESLIZAMENTO .....	48
IV.4.3.1	- EQUAÇÕES .....	48
IV.4.3.2	- CONDIÇÕES DE CONTORNO ....	48
IV.4.4	- FASE 5 - ENTRADA NA ÁGUA .....	48
IV.4.4.1	- EQUAÇÕES .....	48
IV.4.4.2	- CONDIÇÕES DE CONTORNO ....	49
IV.5	- FORMULAÇÃO MATRICIAL .....	49
IV.5.1	- EQUAÇÕES MATRICIAIS .....	49
IV.5.2	- SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES .....	55
V	- MODELO APLICADO A UMA JAQUETA SIMPLIFICADA .....	57
V.1	- MODELO MATEMÁTICO .....	57
V.2	- EQUAÇÕES SIMPLIFICADAS DO MODELO .....	58
V.2.1	- FASE I .....	58
V.2.2	- FASE II - ENTRADA NA ÁGUA .....	60
V.2.3	- FASE III - ROTAÇÃO .....	60
V.2.4	- COORDENADAS .....	63
V.2.5	- ÁREAS SECCIONAIS .....	65
V.3	- PROGRAMAS DE COMPUTADOR .....	65
V.3.1	- PROGRAMA PRINCIPAL .....	65
V.3.2	- PROGRAMA DIFFIN .....	66
V.3.3	- PROGRAMA POSJAC .....	66
V.3.4	- PROGRAMA ENTRAG .....	66

V.3.5	- PROGRAMA MOMEN .....	66
V.3.6	- PROGRAMA TABLE .....	66
VI	- COMPORTAMENTO NUMÉRICO DO MODELO .....	68
VI.1	- EXEMPLO ILUSTRATIVO .....	68
VI.2	- ESTUDO NUMÉRICO .....	69
VI.3	- COMPARAÇÃO DE RESULTADOS .....	86
VI.4	- COMPARAÇÃO COM RESULTADOS PRODUZIDOS POR OUTROS ...	86
VI.5	- COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	87
VII	- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	88
VII.1	- RESUMO DOS RESULTADOS .....	88
VII.2	- ORIENTAÇÃO PARA PESQUISAS FUTURAS .....	90
BIBLIOGRAFIA .....		91
ANEXOS .....		93
I	- ÁREAS SECCIONAIS .....	93



## CAPÍTULO I

### I - INTRODUÇÃO

#### I.1 - Detalhes Preliminares

O desenvolvimento da atividade offshore no Brasil trouxe inúmeros desafios para a engenharia de projetos.

A medida que as estruturas de Plataformas Fixas tipo Jaqueta foram aumentando de tamanho e de peso, as dificuldades de instalação aumentaram, sendo necessárias teorias e métodos para representar os problemas físicos o mais real possível.

Um dos problemas mais complexos a serem analisados é o correspondente à instalação da Plataforma uma vez terminada a fabricação em terra.

Os estudos da instalação de uma estrutura de Plataforma Fixa tipo Jaqueta compreende os seguintes temas:

- Carregamento da estrutura da jaqueta na balsa
- Transporte até o lugar de instalação
- Lançamento da estrutura da jaqueta no local
- Flutuação
- Verticalização
- Estabilidade
- Cravação das estacas

Todas estas fases são importantes para o dimensionamento da estrutura e para fixar os procedimentos de instalação.

Em geral as normas existentes mencionam a necessidade de serem efetuadas as análises relativas as fases acima, mas não dizem como devem ser feitas nem as considerações

teóricas que podem ser utilizadas nem os procedimentos que devem ser elaborados.

Da mesma maneira não existe literatura relativa a essas fases que possa ser aplicada a este tipo de estrutura de jaqueta, a não ser uma publicação de autoria de Cheng-Heng Lu (ref. 1) muito sucinta.

Especificamente no caso da Petrobrás, esta fase da instalação tem sido estudada e resolvida por companhias de projeto estrangeiras, e os programas de computador utilizados são de propriedade dessas firmas.

Atualmente a Petrobrás possui um programa muito completo e versátil que permite estudar a fase de flutuação da jaqueta em forma estática e similar a verticalização em forma discreta considerando ou não o uso do guindaste. Este programa foi desenvolvido integralmente no Brasil e reflete o estado de arte de engenharia nesta área.

Em forma comercial existe no Brasil atualmente um sistema chamado OSCAR que permite estudar as diferentes fases da instalação de jaquetas em forma dinâmica em função do tempo, considerando a influência das ondas e correntezas, amarrações e embarcações se for o caso.

Das fases citadas acima, no presente trabalho é analisado o Lançamento de Jaquetas, por ser a fase em que são geradas grandes tensões localizadas em áreas reduzidas da estrutura, especificamente os nós e membros em contato com as vigas de rotação da balsa que possui uma área muito pequena.

Estas tensões são provocadas pelas forças de inércia, forças hidrodinâmicas, forças de empuxo, e reação da balsa

sobre a jaqueta nas vigas de rotação.

Neste ponto também são importantes as condições de equilíbrio e estabilidade para evitar os fenômenos de rotação e levantamento da jaqueta.

Para poder estudar corretamente os problemas citados acima é indispensável conhecer a trajetória da jaqueta durante a operação de lançamento, o qual pode ser feito através de modelo físico no laboratório ou de modelo numérico no computador.

Para a Petrobrás é importante ter um programa de computador que permita uma análise rápida e preliminar de uma jaqueta na fase de lançamento no primeiro estágio do projeto, ainda que do lado conservativo da solução.

## 1.2 - Objetivos do Trabalho

O trabalho a ser desenvolvido nos capítulos seguintes, tenta analisar e resolver preliminarmente este problema, mediante a utilização de um modelo matemático simplificado, cuja formulação foi preparada especialmente. Para analisar este problema, será desenvolvida uma análise dividida nos seguintes itens:

### - Formulação do Problema

Será descrito o problema em forma genérica, discutindo as diversas fases em que pode ser dividido, com os principais parâmetros que intervêm e a influência que tem dentro de cada passo. Também serão identificadas as forças relevantes que atuam em cada fase.

## - Formulação Teórica

Será apresentada a teoria tridimensional que rege o fenômeno, com uma formulação das equações básicas.

A seguir será apresentada a teoria bidimensional do conjunto barcaça-jaqueta, com um planteamento das equações. O desenvolvimento das equações será feito para a teoria bidimensional, considerando a barcaça fixa primeiro, e depois móvel, indicando as condições de contorno em cada fase em que foi dividido o fenômeno.

Finalmente serão solucionadas as equações de equilíbrio, usando métodos iterativos para integrar as equações de movimento.

## - Programas de Computador

O modelo matemático analisado será transformado em um programa de computador que dará a solução do problema, nas diferentes fases em que foi dividido.

## - Exemplo Ilustrativo

Finalmente será resolvido um exemplo de uma jaqueta real, para representar graficamente as condições durante flutuação e lançamento considerando diversas alternativas.

## - Comparação do Modelo Matemático com Resultados Experimentais em Modelo Reduzido

Será incluído um resultado de lançamento de jaqueta, efetuado em ensaios em modelo reduzido, e comparados os resultados obtidos, com aqueles correspondentes ao modelo matemático.

## CAPÍTULO II

## II - ANÁLISE DO LANÇAMENTO DE JAQUETAS

II.1 - Descrição do Problema

O lançamento de Estruturas Offshore tipo jaqueta, é efetuado normalmente de uma barça de serviço, que também serve para o transporte da estrutura, e que é especialmente equipada para este tipo de trabalho.

Uma vez que a jaqueta é fabricada no canteiro, ela é carregada por deslizamento, desde as vigas sobre as quais foi construída, e colocada sobre as vigas de lançamento da barça, sobre a qual é fixada na posição para transporte, por meio de amarrações especiais, como indicado na Figura II.1.

Terminada esta fase, a barça leva a estrutura até o local da instalação, onde será lançada e posicionada no local.

A barça é posicionada de maneira a minimizar os esforços de onda, vento e correnteza sobre o conjunto na operação de lançamento.

O lançamento pode ser iniciado basicamente de duas (2) maneiras:

- (i) dando um ângulo de inclinação inicial na barça,
- (ii) e/ou usando um guincho para dar o movimento inicial.

O resto dos métodos, são variantes dos apresentados aqui, usando macaco em lugar de guincho, ou ainda uma ou tra barça para puxar a jaqueta e iniciar o lançamento.

Iniciado o movimento, a jaqueta desliza até che

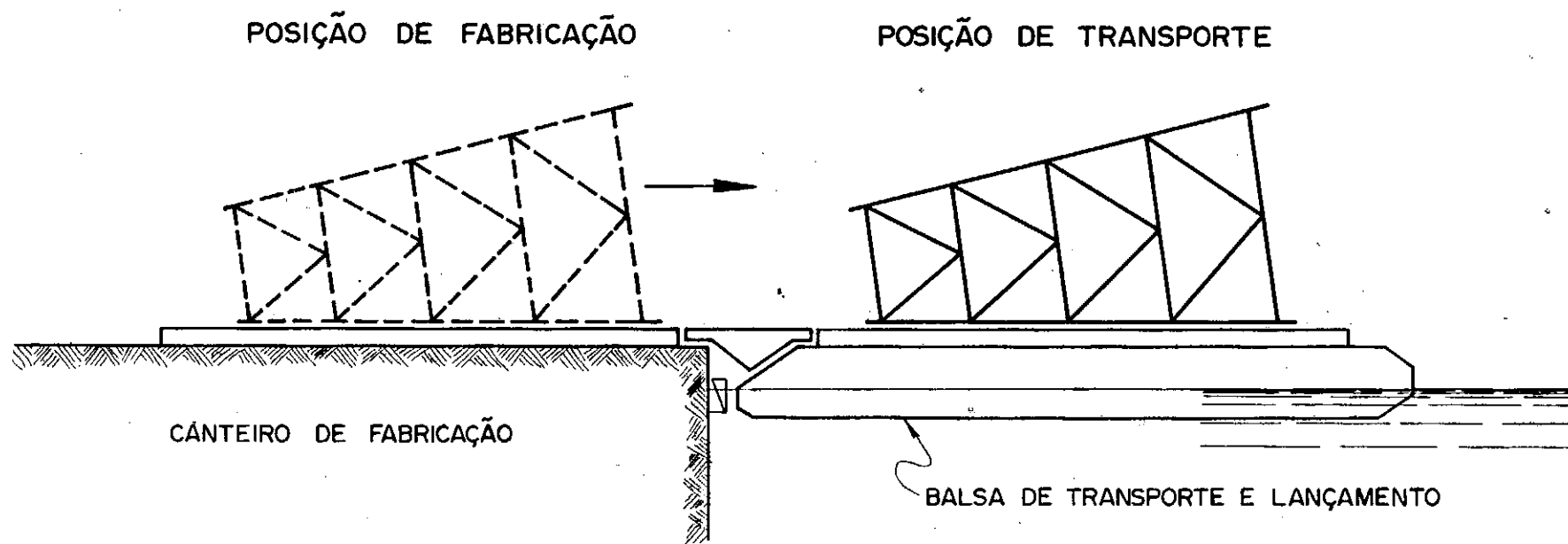


FIG. II-1

gar nas vigas extremas separadas das vigas de lançamento e que possuem a capacidade de girar em torno de um pino, fazendo com que a jaqueta gire e comece a entrar na água.

Depois de entrar na água, a jaqueta continua em movimento até alcançar a posição de equilíbrio estático flutuante e rebocada até o local de verticalização.

Finalmente a jaqueta é ligada por meio de um guindaste já posicionado para essa operação, e verticalizada para ser instalada no sítio exato, para posteriormente se proceder à cravação das estacas de fixação da plataforma no local.

## 11.2 - Fases do Lançamento

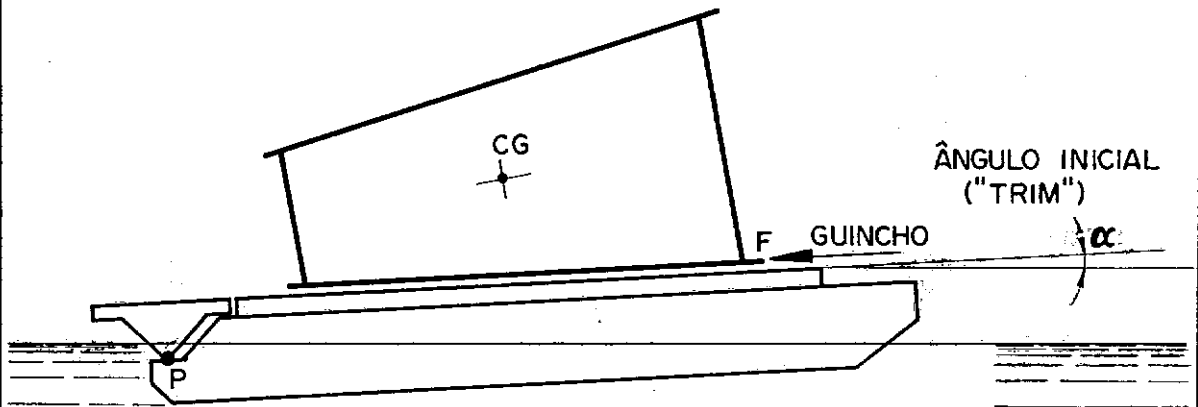
A seguir serão apresentadas as diferentes fases durante o processo de lançamento já descrito.

### 11.2.1 - Fase 1 - Posição de Lançamento

A posição de lançamento é determinada de modo que a força do guincho sobre a estrutura para vencer o atrito estático, seja mínima; ajudando-se para esse efeito com um ângulo inicial na barça por meio de uma variação nos tanques de lastro, tal como indicado na Figura 11.2.

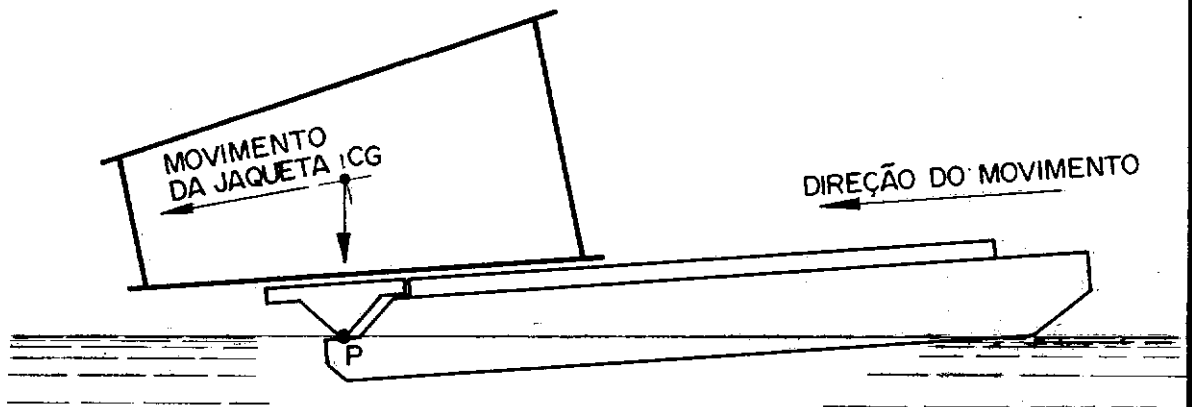
### 11.2.2 - Fase 2 - Deslizamento da Jaqueta

Iniciado o movimento, a jaqueta desliza sobre as vigas de lançamento da Barça até que o Centro de Gravidade da estrutura alcança o pino de rotação da viga extrema, denominada Viga de Rotação. O ângulo de inclinação da Barça começa a aumentar, iniciando-se um movimento de retrocesso da Barça, como indicado na Figura 11.3.



FASE 1

FIG. II - 2



FASE 2

FIG. II - 3



Neste ponto a estrutura pode ou não entrar na água, dependendo das condições do lançamento e as características da jaqueta.

#### 11.2.3 - Fase 3 - Rotação da Estrutura

Uma vez que o C.G. passa sobre o pino de rotação (P) da viga extrema, o movimento da jaqueta que antes era de deslizamento, passa a ser de rotação. Dependendo das características da estrutura, do atrito e do ângulo inicial, esta fase pode ser mista, ou seja, rotação e deslizamento como indicado na Figura 11.4.

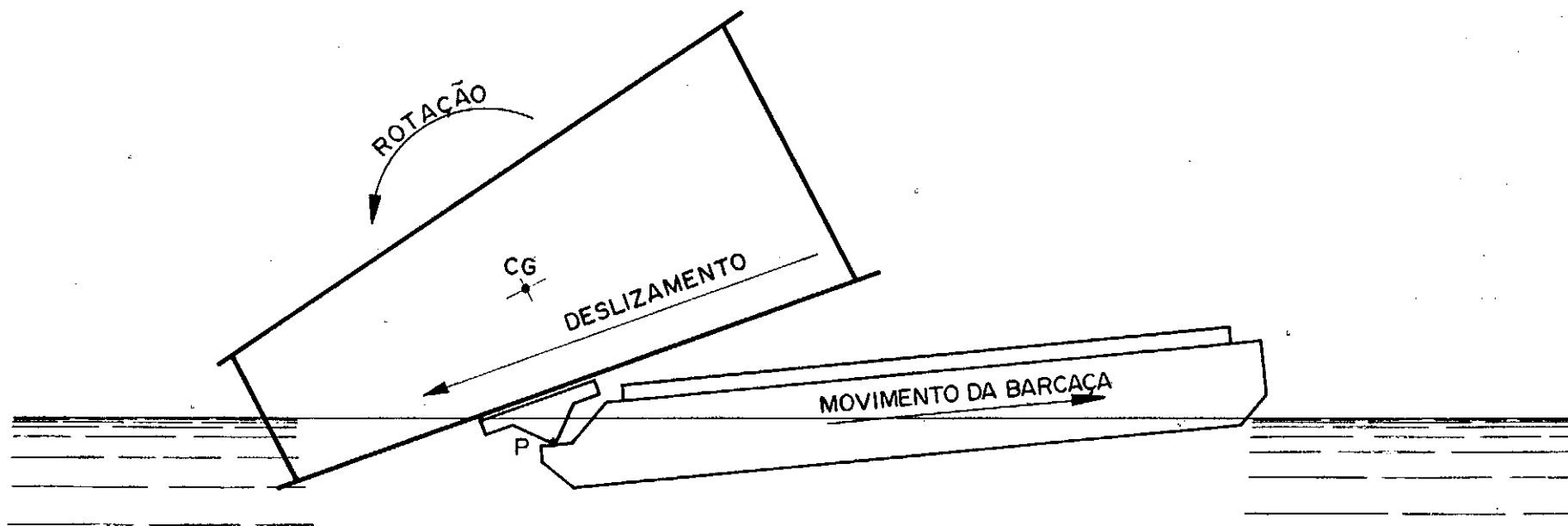
Nesta fase a jaqueta já terá entrado na água, modificando as características do movimento. A viga de rotação acompanha o movimento da jaqueta, e a Barcaça começa a voltar ao ângulo inicial, continuando o movimento de retrocesso.

#### 11.2.4 - Fase 4 - Rotação e Deslizamento

Depois que a jaqueta começa a rotação e entra na água, o movimento continua misto ou seja rotação e deslizamento sobre a viga extrema, chegando no limite a ser puro deslizamento, até a estrutura entrar completamente na água. A Barcaça continua no movimento de retrocesso, cada vez mais pronunciado como se vê na Figura 11.5.

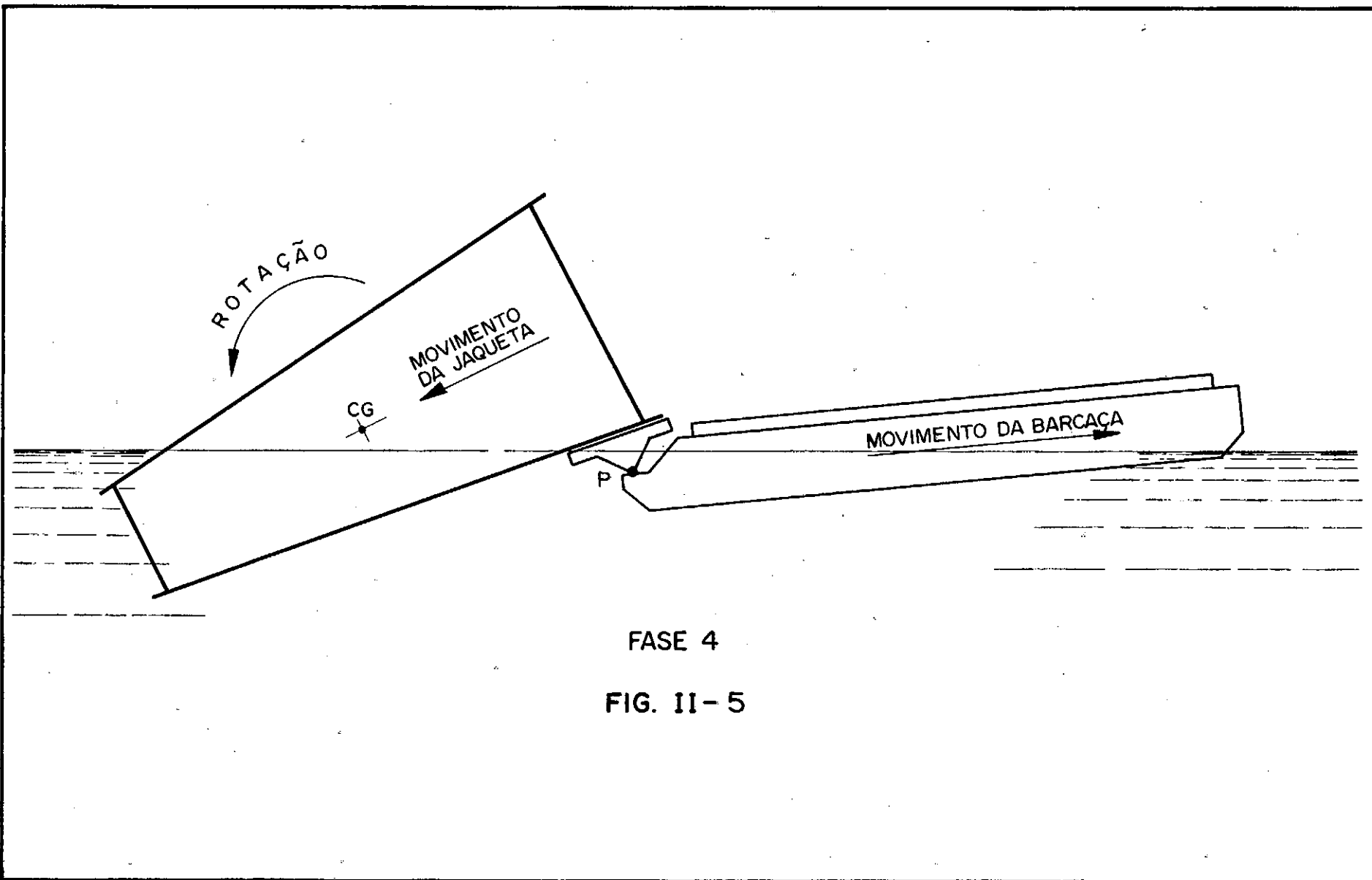
#### 11.2.5 - Fase 5 - Entrada na Água

A jaqueta finalmente desliza na ponta da viga extrema da Barcaça, e entra completamente na água, chegando até o afundamento máximo, e continuando o movimento até a posição de equilíbrio estático de flutuação.



FASE 3

FIG. II-4



A Barcaça continua em movimento, até chegar à sua própria posição de equilíbrio final como indicado na Figura 11.6.

Basicamente estas cinco fases, são as fases principais do lançamento, e que servem para identificar todas forças e as condições de contorno ou restrições do problema.

### 11.3 - Forças no Lançamento

#### 11.3.1 - *Identificação das Forças*

Como o lançamento está dividido em várias fases diferentes, serão identificadas duas fases intermediárias, e colocadas as forças que atuam em geral. Estas forças poderão ser nulas em alguma outra fase do lançamento, tal como indicado na Figura 11.7.

$W_J$  = Peso da jaqueta, atuando no Centro de Gravidade da jaqueta (C.G<sub>J</sub>);

$W_B$  = Peso da Barcaça, incluído lastreamento para lançamento, atuando no Centro de Gravidade da Barcaça (C.G<sub>B</sub>);

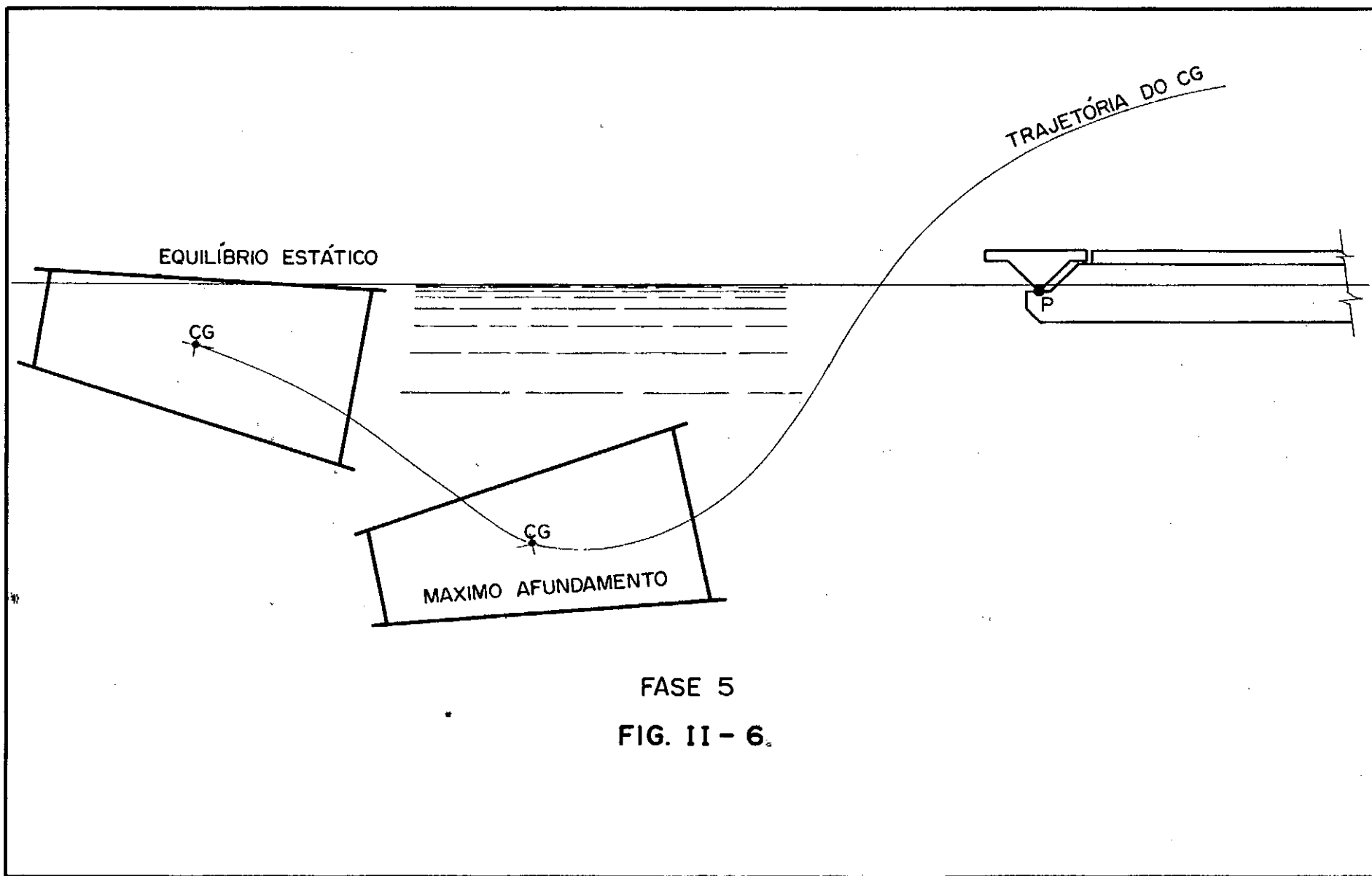
$B_B$  = Empuxo da Barcaça, atuando no Centro de Empuxo (C.B<sub>B</sub>);

$F_W$  = Força no guincho, necessária para vencer o atrito estático;

$R$  = Força resistente devido ao peso da jaqueta e ao atrito entre jaqueta e Barcaça na área de contato;

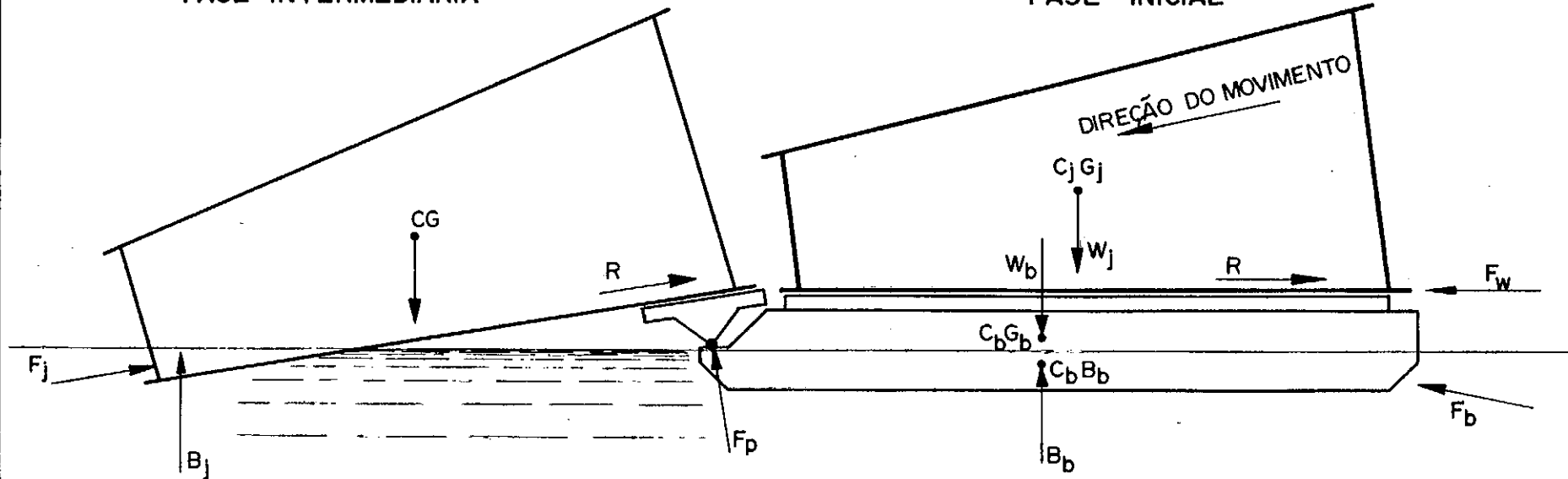
$F_P$  = Reação no pino da viga extrema da Barcaça;

$B_J$  = Empuxo da jaqueta, ou parte dela, atuando no Centro de Empuxo da parte submersa;



FASE INTERMEDIÁRIA

FASE INICIAL



$W_j$  - PESO DA JAQUETA

$W_b$  - DESLOCAMENTO DA BARÇAÇA

$B_b$  - EMPUXO DA BARÇAÇA

$F_w$  - FORÇA NO GUINCHO

$R$  - FORÇA DO ATRITO RESISTENTE

$F_p$  - REAÇÃO NO PINO DA VIGA

$B_j$  - EMPUXO DA JAQUETA

$F_j$  - FORÇA RESISTENTE DA ÁGUA SOBRE A JAQUETA

$F_b$  - FORÇA RESISTENTE DA ÁGUA NA BARÇAÇA

FIG. II - 7

$F_J$  = Força resistente da água sobre a jaqueta, atuando nos diferentes elementos submersos da estrutura;

$F_B$  = Força resistente da água na Barcaça.

### 11.3.2 - Análise Descritiva das Forças

$W_J$  = *Peso da Jaqueta:*

Depende da geometria da estrutura e dos materiais usados. É um valor fixo, e sua distribuição na geometria, determinará a posição do Centro de Gravidade da jaqueta.

$W_B$  = *Peso da Barcaça:*

Depende da geometria da Barcaça, dos equipamentos, do lastro que está sendo usado, e dos materiais que compõem a estrutura. Esta distribuição de pesos e geometria determina a posição do Centro de Gravidade da Barcaça.

$F_W$  = *Força no Guincho:*

Esta força é uma função direta do peso da estrutura ( $W_J$ ), do atrito estático ( $f_s$ ) entre as áreas de contato entre jaqueta e Barcaça, e o lubrificante ou graxa que está sendo usado entre as duas superfícies de deslizamento. Uma vez iniciado o movimento, esta força deixa de atuar.

$R$  = *Força de Atrito:*

Esta força deve ser dividida em duas partes, devido às características do fenômeno físico. Uma força

$R_s$ , proveniente do atrito estático, e outra força  $R_d$ , proveniente do atrito dinâmico uma vez iniciado o movimento. Estas duas forças servem para dimensionar a capacidade do guincho de lançamento.

$B_B$  = Empuxo da Barcaça:

Esta força é causada pela condição de flutuação da barcaça, e é função do peso total de barcaça, da distribuição dos tanques de lastro e da configuração geométrica da barcaça.

Seu valor é variável no tempo, já que depende da posição relativa da barcaça com respeito à linha da água, e da posição da jaqueta sobre a balsa.

$B_J$  = Empuxo da Jiqueta:

O empuxo da jaqueta, é uma força que depende das características geométricas da estrutura, dos materiais e da distribuição dos pesos e volumes das diferentes componentes.

Esta força varia à medida que a estrutura entra na água, nas diferentes fases de lançamento, e atua no Centro de Empuxo da parte submersa.

$F_P$  = Reação do Pino:

A reação no pino da viga extrema da barcaça, é originada pelo peso próprio da jaqueta.  $W_J$ , à força de empuxo sobre a jaqueta  $B_J$ , à força de atrito  $R_d$  entre jaqueta e viga de rotação, e à força resistente da água sobre a parte submersa da jaqueta  $F_J$ .



Esta força varia no tempo, dependendo das fases de lançamento.

$F_J$  = *Força Resistente da Água sobre a Parte Submersa da Jaqueta:*

Esta força é derivada da resistência que a água exerce sobre os membros da jaqueta que estão entrando na água, à medida que a estrutura vai submergindo.

Em geral depende do tipo do elemento, do arrasto, da inércia das massas, da viscosidade da água e da velocidade e geometria da estrutura.

Normalmente se considera como uma força do tipo "Força de Morison", tal como é usado na teoria de ondas para calcular forças de onda sobre elementos, considerando a influência da massa adicionada.

Esta força é variável no tempo, devido às diversas fases de lançamento.

$F_B$  = *Força Resistente da Água sobre a Barcaça:*

A força resistente da água sobre a barcaça, é uma força hidrodinâmica devida ao movimento de retrocesso que suporta a balsa, quando a estrutura está em movimento.

Esta força depende da geometria da barcaça, do arrasto, da inércia das massas e da viscosidade da água, e é variável no tempo devido às diferentes fases de lançamento.

## 11.4 - Hipóteses e Parâmetros

### 11.4.1 - *Introdução*

Será feita uma análise para os dois corpos que tomam parte deste fenômeno físico, considerando como hipótese principal que a água como elemento participante, tem características físicas definidas e não tem ondas nem correnteza.

Também não será considerado o efeito do vento sobre os dois corpos, pelo menos com influência direta nas equações.

Adicionalmente os dois corpos, serão considerados corpos rígidos, para analisar as equações de movimento.

### 11.4.2 - *Jaqueta*

Será identificada por um sistema de coordenadas próprio, similar ao usado na Análise Estrutural mediante computador.

### 11.4.3 - *Barcaça*

A barcaça será considerada como corpo rígido, e identificada pelas dimensões mais representativas, tais como, comprimento total, comprimento na base, altura total, largura, Centro de Gravidade, peso, momentos de inércia, altura da viga de lançamento, coeficientes de arrasto e de inércia.

Para os coeficientes de arrasto e de inércia poderão ser usados valores empíricos de barcaças típicas, ou calculados com fórmulas aproximadas.

#### 11.4.4 - Atrito

Os coeficientes de atrito estático  $f_s$ , e dinâmico  $f_d$ , serão considerados nas equações, e seus valores serão determinados posteriormente, já que dependem das áreas em contato. Normalmente são usadas áreas típicas de contato tais como: aço-aço; aço-teflon; madeira-madeira, e/ou colocando lubrificante entre ambas superfícies.

## CAPÍTULO III

## III - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

III.1 - Introdução

Será desenvolvida nesta parte a formulação matemática tridimensional, considerando os dois corpos, como sólidos completamente rígidos, ligados por condições de compatibilidade durante o movimento.

Cada corpo será analisado independentemente, usando o princípio de Newton para corpos em movimento (2ª lei) e depois serão impostas as condições de contorno e de compatibilidade.

Para equacionar o problema e ter referência única, são usados três sistemas de eixos:

i ) Sistema absoluto fixo ao nível da água, com o eixo  $X$  paralelo à direção de movimento e o eixo  $Z$  vertical positivo fora da água:

$X, Y, Z$ .

ii ) Sistema local no C.G. da jaqueta:  $i, j, k$ .

iii) Sistema local no C.G. da Barcaça:  $x, y, z$ ,

como indicado na Figura III.1.

Cada corpo tem movimento de translação e rotação, e este movimento pode ser representado com respeito aos eixos locais ou absolutos e para tal serão usados os "Ângulos de Euler", segundo  $i, j, k$ , ou  $x, y, z$ .

Seja

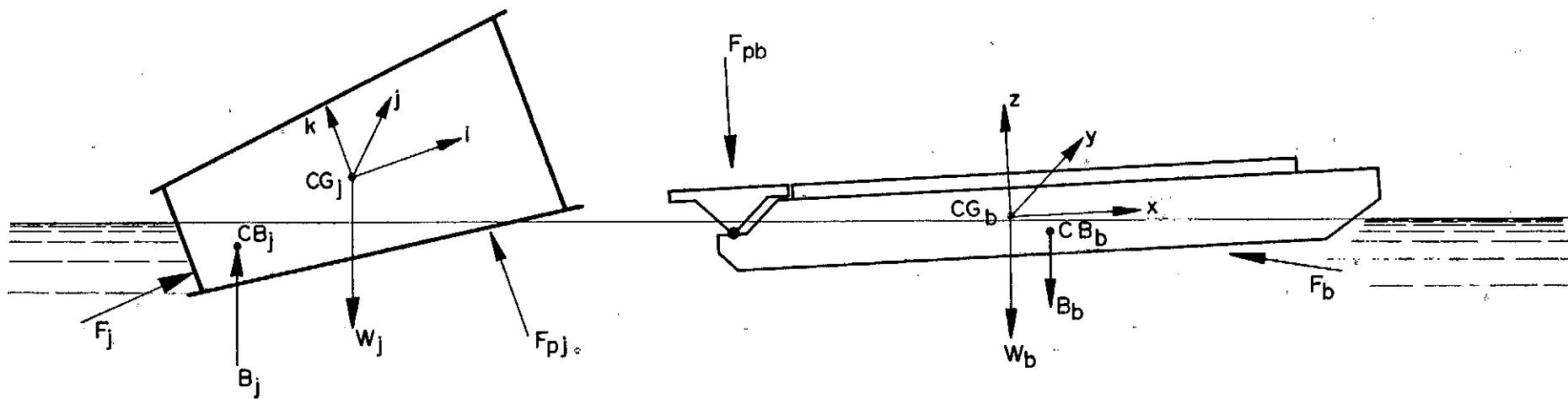


FIG. III - 1

$\underline{u}$  o vetor de deslocamento do corpo, e

$\underline{w}$  o vetor de velocidade angular, que pode ser representado em função dos "Ângulos de Euler".

Segundo a 2<sup>a</sup> Lei de Newton:

$$\Sigma \underline{F} = \underline{m} \ddot{\underline{u}} = \frac{d}{dt} (\underline{m} \dot{\underline{u}}) \quad \text{variação de momentum linear} \quad (III.1)$$

$$\Sigma \underline{M} = \underline{I} \dot{\underline{w}} = \frac{d}{dt} (\underline{I} \underline{w}) \quad \text{variação de momentum angular} \quad (III.2)$$

$\underline{m}$  = matriz de massas associadas ao movimento

$\underline{F}$  = vetor de forças atuantes sobre o corpo

$\underline{I}$  = matriz de momento de inércia das massas

$\underline{M}$  = vetor de momentos das forças aplicadas

### III.2 - Equações para a Jaqueta

Aplicando a 2<sup>a</sup> Ley de Newton à jaqueta como corpo isolado, temos:

$$\underline{m}_J \ddot{\underline{u}}_J = \underline{F}_J + \underline{B}_J + \underline{W}_J + \underline{F}_{pJ} + \underline{R} \quad (III.3)$$

$$\underline{I}_J \dot{\underline{w}}_J = \underline{M}_{fJ} + \underline{M}_{bJ} + \underline{M}_{wJ} + \underline{M}_{fpJ} + \underline{d} \times \underline{F}_{pJ} + \underline{M}_R \quad (III.4)$$

Analisando os termos da equação (III.3), temos:

$\underline{m}_J$  = matriz de massas da Jaqueta =  $\sum_{i=1}^n \underline{m}_i$ ;  $n = n^\circ$  de barras e pesos distribuídos.

$\underline{d}$  = distância entre C.G.<sub>J</sub> e P (pino da gangorra)

$\underline{W}_J$  = peso da jaqueta =  $\underline{m}_J \cdot g$

$F_{PJ}$  = reação do pino da viga sobre a jaqueta

$B_J$  = empuxo das barras submersas =  $\sum_{i=1}^n b_i$ ;  $n$  = nº de barras submersas.

$F_J$  = força de arrasto e de inércia nas barras submersas.

$$F_J = \sum_{i=1}^n f_i \quad f_i = \text{força da água sobre a barra } i$$

$$= \sum f_d + \sum f_m$$

sabemos que  $F_J = F_d + F_m$  (III.5)

$$\text{com } F_d = \sum_{i=1}^n f_d = \sum_{i=1}^n C_{di} \frac{\rho D}{2g} \dot{v}_i / \dot{v}_i / \quad (\text{III.6}) \quad \text{arrasto}$$

$$\text{e } F_m = \sum_{i=1}^n f_m = \sum_{i=1}^n C_{mi} \frac{\rho}{2g} \ddot{v}_i \quad (\text{III.7}) \quad \text{inércia}$$

mas como o movimento de cada barra é uma rotação relativa a seu próprio sistema no C.G. da jaqueta, podemos colocar que:

$v_i$  = velocidade relativa de cada barra aos eixos globais

S. Global    S. Local

$$\ddot{v}_i = \ddot{u}_i + \dot{\omega}_i r_i \quad (\text{III.8}) \quad \text{relativo ao sistema absoluto.}$$

O índice  $i$  identifica a barra.

Substituindo (III.8) em (III.7) e por ser corpo rígido  $\ddot{u}_i = \ddot{u}_j$

$$F_m = \sum_{i=1}^n \left( C_{mi} \frac{\rho}{2g} \ddot{u}_j + C_{mi} \frac{\rho}{2g} r_i \dot{\omega}_i \right)$$

ou

$$\underline{F}_m = \sum_{i=1}^n (\underline{m}_{ai} \ddot{\underline{u}}_j + \underline{L}_i \dot{\underline{w}}_i) \quad (III.9)$$

com  $\underline{m}_{ai}$  = matriz de massas adicionadas de cada barra  $\underline{i}$

$\underline{L}_i$  = matriz de massas adicionadas que relaciona movimento angular e linear de cada barra  $\underline{i}$

substituindo (III.9) em (III.3)

$$\underline{m}_j \ddot{\underline{u}}_j = \underline{F}_d - \sum \underline{L}_i \dot{\underline{w}}_i - \sum \underline{m}_{ai} \ddot{\underline{u}}_j + \underline{B}_j + \underline{W}_j + \underline{F}_{pj} \quad (III.10)$$

o índice  $\underline{j}$ , identifica a Jaqueta.

$R$  = força do atrito entre jaqueta e barçaça.

$C_{mi} = 1 + C_m$  tal como definido na eq.de Marison.

$$C_{di} = 1 + C_d$$

$C_m$  = coeficiente de massa hidrodinâmica

$C_d$  = coeficiente de arrasto.



Para a equação (III.4) temos:

$$\begin{aligned} \underline{I}_J &= \text{matriz dos momentos de inércia das massas da jaqueta} = \\ &= \sum_{i=1}^n m_i \underline{r}_i^2 \end{aligned}$$

$$\underline{M}_{bJ} = \text{vetor de momentos das forças de empuxo}$$

$$\underline{M}_{wJ} = \text{vetor de momentos da força peso}$$

$$\underline{M}_{fpJ} = \text{vetor de momentos no pino da viga extrema}$$

$$\underline{M}_{fJ} = \text{vetor de momentos das forças de arrasto, de inércia e da força do atrito}$$

Segundo (III.9) temos:-

$$\underline{M}_{fJ} = \underline{M}_{fd} + \sum_{i=1}^n (\underline{I}_{ai} \dot{\underline{w}}_i + \underline{L}_i \ddot{\underline{u}}_i) \quad (\text{III.11})$$

$$\underline{M}_{fd} = \text{vetor de momentos das forças de arrasto}$$

$$\underline{I}_{ai} = \text{momento de inércia das massas adicionadas da barra } \underline{i}$$

então substituindo (III.11) em (III.4):

$$\underline{I}_J \dot{\underline{w}}_J = \underline{M}_{fd} - \sum_{i=1}^n \underline{I}_{ai} \dot{\underline{w}}_i - \sum_{i=1}^n \underline{L}_i \ddot{\underline{u}}_i + \underline{M}_{bJ} + \underline{M}_{wJ} + \underline{M}_{fpJ} + \underline{d} \times \underline{F}_{pJ} \quad (\text{III.12})$$

As equações (III.10) e (III.12) representam o movimento da jaqueta referido ao sistema fixo, considerando as influências de todas as cargas e parâmetros.

### III.3 - Equações para a Barcaça

Para a Barcaça podemos usar o desenvolvido no caso das equações da jaqueta, temos assim da equação (III.3) e (III.4):

$$\underline{m}_B \ddot{\underline{u}}_B = \underline{F}_B + \underline{B}_B + \underline{W}_B + \underline{F}_{pB} + \underline{R} \quad (\text{III.13})$$

$$\underline{I}_B \dot{\underline{w}}_B = \underline{M}_{fB} + \underline{M}_{BB} + \underline{M}_{WB} + \underline{d} \times \underline{F}_{pB} \quad (\text{III.14})$$

onde cada termo tem o mesmo significado que anteriormente, só que aplicado na barcaça.

Aplicando o já desenvolvido para a jaqueta, temos que a equação (III.10) e (III.12) podem ser transformadas a:

$$\underline{m}_B \ddot{\underline{u}}_B = \underline{F}_d - \sum \underline{L}_i \dot{\underline{w}}_i - \sum \underline{m}_{ai} \ddot{\underline{u}}_i + \underline{B}_B + \underline{W}_B + \underline{F}_{pB} + \underline{R}$$

e  $(\underline{m}_B + \underline{m}_{aB}) \ddot{\underline{u}}_B = \underline{F}_d + \underline{B}_B + \underline{W}_B + \underline{F}_{pB} - \underline{L}_B \dot{\underline{w}}_B$  já que a barcaça é um corpo sólido.

$$(\underline{m}_B + \underline{m}_{aB}) \ddot{\underline{u}}_B + \underline{L}_B \dot{\underline{w}}_B = \underline{F}_d + \underline{B}_B + \underline{W}_B + \underline{F}_{pB} + \underline{R} \quad (\text{III.15})$$

Analogamente:

$$\underline{I}_B \dot{\underline{w}}_B = \underline{M}_{fd} - \sum \underline{I}_{ai} \dot{\underline{w}}_i - \sum \underline{L}_i \ddot{\underline{u}}_i + \underline{M}_{BB} + \underline{M}_{WB} + \underline{M}_{fpB} + \underline{d} \times \underline{F}_{pB}$$

$$(\underline{I}_B + \underline{I}_{aB}) \dot{\underline{w}}_B + \underline{L}_B \ddot{\underline{u}}_B = \underline{M}_{fd} + \underline{M}_{BB} + \underline{M}_{WB} + \underline{M}_{fpB} + \underline{d} \times \underline{F}_{pB} \quad (\text{III.16})$$

O índice B indica barcaça.

As equações (III.10), (III.12), (III.15) e (III.16) em conjunto, refletem o movimento da jaqueta e barcaça, referidos aos mesmos eixos fixos.

As incógnitas neste caso são  $\ddot{u}_J, \ddot{u}_B, \dot{w}_J, \dot{w}_B, F_{pJ}, F_{pB}, M_{fpJ}, M_{fpB}$ , todos vetores de  $1 \times 3$ , o que dá 24 incógnitas, e 12 equações, mas temos que por condição de compatibilidade:

$$\left. \begin{aligned} F_{pJ} &= - F_{pB} \\ M_{fpJ} &= - M_{fpB} \end{aligned} \right\}$$

então reduzimos as incógnitas a 18 ao todo.

Para solucionar então estas equações precisamos de duas equações matriciais a mais, que vem das condições de contorno e compatibilidade de cada fase do lançamento.

Adicionalmente devem incluir-se as matrizes de rotação para transformar as direções dos movimentos relativos entre sistemas coordenados, e que serão desenvolvidas para cada caso particular nos capítulos seguintes.

Em resumo, as equações dos dois corpos em movimento estão representadas da seguinte maneira:

$$\text{JAQUETA} \left\{ \begin{aligned} m_J \ddot{u}_J + \sum_{i=1}^n m_{ai} \ddot{u}_J + \sum_{i=1}^n L_i \dot{w}_i &= F_{dJ} + B_J + W_J + F_{pJ} + R \quad (III.10) \\ I_J \dot{w}_J + \sum_{i=1}^n L_i \ddot{u}_J + \sum_{i=1}^n I_{ai} \dot{w}_i &= M_{dJ} + M_{BJ} + M_{wJ} + M_{fpJ} + d_J \times F_{pJ} \end{aligned} \right. \quad (III.12)$$

$$\text{BARCAÇA} \left\{ \begin{aligned} (\underline{m}_B + \underline{m}_{aB}) \ddot{\underline{u}}_B + \underline{L}_B \dot{\underline{w}}_B &= \underline{F}_{dB} + \underline{B}_B + \underline{W}_B + \underline{F}_{pB} + \underline{R} \\ (\underline{I}_B + \underline{I}_{aB}) \dot{\underline{w}}_B + \underline{L}_B \ddot{\underline{u}}_B &= \underline{M}_{Fd} + \underline{M}_{BB} + \underline{M}_{wB} + (-\underline{M}_{FpJ}) + (-\underline{d}_B \times \underline{F}_{pJ}) \end{aligned} \right. \quad (III.15)$$

$$(III.16)$$

#### III.4 - Análise Prévia das Equações

Como já foi dito, estas equações representam o movimento de dois corpos, que estão ligados por um ponto no pi no da viga extrema de rotação, com 18 incógnitas e 12 equações para resolver em componentes.

Para poder efetivar a sua aplicação falta ainda desenvolver as condições de contorno e de compatibilidade entre os dois corpos, mas independentemente, pode ser analisada cada equação.

Estas equações de movimento, são equações de equilíbrio de forças e momentos, variáveis no tempo, e com termos não lineares, tais como as forças de arrasto  $F_d$  ou com variação tanto contínua quanto discreta como uma dificuldade na solução simples destas equações e deverá recorrer-se a simplifi-cações ou/e ainda usar métodos iterativos os quais eventualmente podem apresentar problemas de convergência.

Outro problema é a presença da matriz  $\underline{L}$  que acopla as acelerações lineares com as acelerações angulares, e cujos valores podem ser de difícil cálculo ou ainda interpreta-ção duvidosa.

O mais importante é a influência das massas adi-cionadas nos movimentos angulares da jaqueta e barça, e que aumentam a importância à medida que a estrutura entra na água

ou a barcaça varia de posição. Estes movimentos angulares têm influência na própria aceleração angular, que modifica o movimento resultante da jaqueta, e pelo tanto sua trajetória e afundamento na água.

Baseados nestas considerações, entraremos no próximo capítulo a desenvolver as equações do movimento bidimensional.

## CAPÍTULO IV

## IV - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA BIDIMENSIONAL

IV.1 - Introdução

Baseado na teoria desenvolvida no capítulo anterior introduziremos algumas simplificações na sua análise, considerando sempre dois corpos rígidos, mas adicionando mais duas hipóteses que modela com bastante fidelidade o nosso problema aqui abordado.

- O movimento é plano

- A barcaça é fixa

Primeiro será analisado o movimento só com a hipótese de "movimento plano", e finalmente será incluída a segunda hipótese de "barcaça fixa" para estudar a influência nos resultados.

IV.2 - Movimento Plano

Normalmente devido as características de simetria das jaquetas e/ou distribuição de massas, verifica-se como demonstrado por ensaios em modelos reduzidos, que a maior influência na trajetória e no movimento é refletida no plano do movimento (X, Z), e que as outras componentes são desprezíveis.

Levando estas considerações a nossas equações (III.10), (III.12), (III.15), (III.16), temos que

$$\underset{\sim}{u} = \begin{pmatrix} u_x \\ 0 \\ u_z \end{pmatrix} \quad \underset{\sim}{F}_p = \begin{pmatrix} F_x \\ 0 \\ F_z \end{pmatrix}$$

$$\underline{\tilde{w}} = \begin{pmatrix} 0 \\ w_j \\ 0 \end{pmatrix} \quad \underline{\tilde{M}}_p = \begin{pmatrix} 0 \\ M_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

Assim as 12 incógnitas são reduzidas para 6, com 6 equações que seriam, 3 para a jaqueta e 3 para a barçaça:

$$\underline{\tilde{m}}_J \begin{pmatrix} \ddot{u}_x \\ 0 \\ u_z \end{pmatrix}_J + \sum \underline{\tilde{m}}_{ai} \begin{pmatrix} \ddot{u}_x \\ 0 \\ u_z \end{pmatrix}_i + \sum \underline{\tilde{L}}_i \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{w}_y \\ 0 \end{pmatrix}_i = \underline{\tilde{F}}_{dJ} + \underline{\tilde{B}}_J + \underline{\tilde{W}}_J + \begin{pmatrix} F_x \\ 0 \\ F_z \end{pmatrix} + \underline{\tilde{R}} \quad (IV.1)$$

$$\underline{\tilde{I}}_J \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{w}_y \\ 0 \end{pmatrix}_J + \sum \underline{\tilde{L}}_i \begin{pmatrix} \ddot{u}_x \\ 0 \\ \ddot{u}_z \end{pmatrix}_i + \sum \underline{\tilde{I}}_{ai} \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{w}_y \\ 0 \end{pmatrix}_i = \underline{\tilde{M}}_{FdJ} + \underline{\tilde{M}}_{BJ} + \underline{\tilde{M}}_{WJ} + \begin{pmatrix} 0 \\ M_y \\ 0 \end{pmatrix}_p + d \times \begin{pmatrix} F_x \\ 0 \\ F_x \end{pmatrix}_p \quad (IV.2)$$

Se assumimos intervalos de tempo  $\Delta t$  muito pequenos, tais que o movimento é linear, então podemos assumir que o acoplamento entre a aceleração angular e a linear é nulo, e então a matriz  $\underline{\tilde{L}}$  é identicamente nula, o que fornece 3 equações com 5 incógnitas, já que o momento  $(M_y)_p$  no pino de rotação da viga extrema da barçaça, é identicamente nulo, se aceitamos que existe uma rótula perfeita sem atrito.

As mesmas considerações podem ser efetivadas para a barçaça, chegando as mesmas conclusões anteriores, de 3 equações com 5 incógnitas.

Neste ponto estamos precisando de condições adicionais para resolver a indeterminação, estas condições são tiradas das condições de contorno e compatibilidade, entre

jaqueta e barcaça, durante cada fase.

Para determinar estas condições em cada caso, faremos a análise, primeiro com a barcaça fixa.

#### IV.3 - Barcaça Fixa

Como a barcaça está fixa, temos só as 6 equações da jaqueta para o movimento de deslizamento sobre as vigas de lançamento.

Usando como sistema de referência fixo, um sistema colocado na barcaça tal que o eixo  $Z$  passe pelo eixo de rotação da viga extrema, podemos analisar então cada fase com as suas condições de contorno (ver Figura IV.1).

##### IV.3.1 - Fase 1 - Posição de Lançamento

Esta fase não será considerada nesta análise, nem nas posteriores referências, por não ter influência no movimento, a menos do ângulo inicial para lançamento.

##### IV.3.2 - Fase 2 - Deslizamento da Jaqueta

###### IV.3.2.1 - Equações

Devem ser distinguidos dois casos:

- A jaqueta desliza até que o C.G. chega na posição do pino P.
- Início da rotação (Fase 3).

Neste caso por condição de movimento plano temos:

$$\begin{array}{lll}
 \theta_i = 0 & w_i = 0 & u_i \neq 0 \\
 \theta_j \neq 0 \Rightarrow w_j \neq 0 & ; \text{ e } & u_j = 0 \Rightarrow \dot{u}_j = \ddot{u}_j = 0 \\
 \theta_k = 0 & w_k = 0 & u_k \neq 0
 \end{array}$$



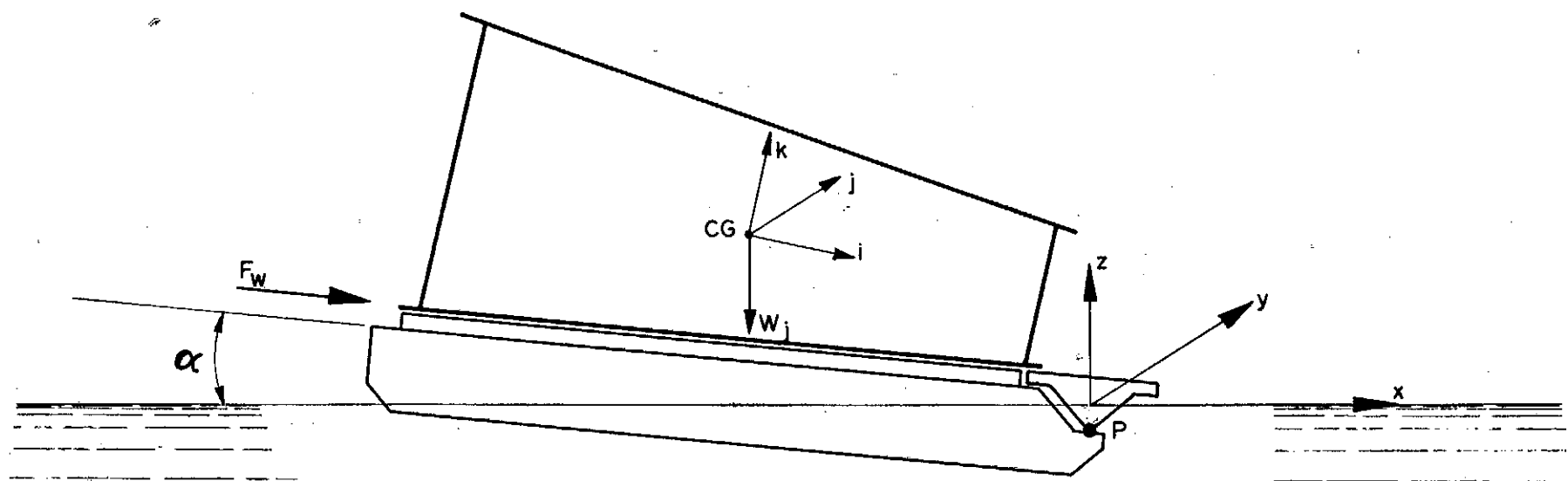


FIG. IV - 1

com  $\underline{F}_p = 0$   $\underline{M}_p = 0$ , mas  $\theta_j = 0 \therefore w_j = 0$ , já que só temos deslizamento, temos então 2 equações e 2 incógnitas, e a equação IV.1 passa a ser:

$$m_J \ddot{u}_x + \sum m_{ai} \ddot{u}_{xi} = W_x + F_{wx}$$

$$m_J \ddot{u}_z + \sum m_{ai} \ddot{u}_{zi} = W_z + F_{wz}$$

com

$$\begin{aligned} W_x &= W \cos \alpha & F_{wx} &= F_w - f W \cos \alpha \\ W_z &= -W \sin \alpha & F_{wz} &= 0 \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{ll} t = 0 & f = f_s \\ t = t & f = f_d \end{array} \right.$$

$f$  = atrito  $f_s$  = estático  $f_d$  = dinâmico

Para usar a referência absoluta dos eixos fixos, devemos ter uma matriz de rotação  $\underline{r}$  entre os dois sistemas.

$$\underline{r} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$\underline{m}_J \ddot{\underline{u}} = \underline{W}_J + \underline{F}_w \quad \text{eixos locais}$$

$$\underline{u}_G = \underline{r} \underline{u}_l$$

$$\underline{m}_J \ddot{\underline{u}}_G = \underline{r} (\underline{W}_J + \underline{F}_w) \quad (\text{IV.3})$$

equação de movimento em eixos globais, que pode ser resolvida iterativamente até determinar quando o C.G. da jaqueta passa por P.

#### IV.3.2.2 - Condições de Contorno

No instante inicial, em  $t = 0$ , a força no guincho deve vencer o atrito estático, levando em consideração o ângulo de inclinação inicial da barcaça, temos assim:

$$F_w \geq f_s W \quad \text{em} \quad t = -0 \quad \text{é válida a igualdade;}$$

$$\text{quando} \quad t \geq 0 \quad F_w = f_d W.$$

$$\text{Adicionalmente} \quad \underline{u} = 0 \quad \dot{\underline{u}} = 0.$$

Neste ponto pode ser decidido se a força do guincho continua a atuar e até que limite de tempo ou movimento.

Adicionalmente e conhecida a distância inicial entre o C.G. da jaqueta e o ponto P, esta é usada para comparar com o deslocamento  $\underline{u}$  devido ao impulso da força  $\underline{F}_w$  e determinar quando o C.G. passa sobre o ponto P.

Esta condição corresponde para o C.G. de jaqueta em coordenadas globais a:

$$x_{CG} \leq 0$$

Para as velocidades e deslocamentos neste instante, temos que  $\dot{\underline{u}}$  e  $\underline{u}$  serão usados como condições iniciais da próxima fase, desprezando as reações no pino P da viga de rotação, que já começou a aparecer.

#### IV.3.3 - Fase 3 - Rotação na Viga Extrema (Gangorra)

##### IV.3.3.1 - Equações

São válidas as mesmas hipótese que para a Fase 2, só que é agregado o ângulo  $\theta_j$  que agora é diferente de zero, além das reações no pino de rotação da viga extrema.

Em resumo teremos

$$\theta_j \neq 0 \implies \omega_j \neq 0$$

$$\text{e} \quad F_p \neq 0$$

Neste ponto deve ser considerado o fato que a jaqueta, pode começar a entrar na água, devendo ser consideradas as forças  $F_d$  e  $B_J$ , o que será controlado com as condições de contorno.

As equações (IV.1) e (IV.2) passam a ser:

$$m_J \ddot{u}_J + \sum m_{ai} \ddot{u}_i = F_{dJ} + B_J + W_J + F_{pJ} + R \quad (IV.4)$$

$$I_J \dot{\omega}_J + \sum I_{ai} \dot{\omega}_i = M_{FdJ} + M_{BJ} + M_{WJ} + d \times F_{pJ} \quad (IV.5)$$

As incógnitas são  $\ddot{u}_x$ ,  $\ddot{u}_z$ ,  $\dot{\omega}_y$ ,  $F_{px}$ ,  $F_{pz}$ , cinco em total para 3 equações, mas sabendo que num movimento circular a aceleração linear está relacionada com a aceleração angular.

Neste caso o C.G.<sub>j</sub> roda em torno do pino da viga de rotação, e a aceleração é:

$$\ddot{u}_J = \dot{\omega} (\rho_G - \rho_p) + \omega^2 (\rho_G - \rho_p) \quad (IV.6)$$

com  $\rho_G$  = vetor entre o C.G.<sub>j</sub> e origem de coordenadas

$\rho_p$  = vetor entre o ponto P e origem de coordenadas,

chegamos, assim, a mais duas equações para resolver nosso problema, já que  $\dot{\omega} = \ddot{\theta}$  para movimento plano.

Então as equações (IV.4), (IV.5), (IV.6) são as equações que representam o movimento de rotação de jaqueta, quando esta passa sobre a viga extrema na fase de rotação.

Para representar em eixos globais este movimento, devemos multiplicar as equações pela matriz de rotação  $\underline{r}$ , que a rigor varia no tempo junto com  $\underline{\theta}$ , mas considerando que a solução destas equações será feita por meio de métodos iterativos, é suficiente usar um período do tempo curto para não afetar a matriz  $\underline{r}$ , e, usar o valor de  $\underline{\theta}$ , em cada caso segundo a nova posição de rotação no tempo que está sendo analisado.

#### IV.3.3.2 - Condições de Contorno

Nesta fase são consideradas as seguintes condições de contorno:

- No início da fase de rotação, são usados como valores iniciais os valores de tempo, velocidade, aceleração e forças finais da fase anterior.
- Todas as matrizes devem ser recalculadas no tempo para cada passo, devido à rotação da jaqueta.
- Detetar a possível entrada na água, para calcular  $\underline{F_d}$  e  $\underline{B_j}$ , e as massas adicionadas da jaqueta.
- Verificar estabilidade para não provocar "lifting" ou "tipping", se a estrutura entra na água.
- Verificar quando a jaqueta além de girar, começa a deslizar, que corresponderia ao início da fase seguinte.

#### IV.3.4 - Fase 4 - Rotação e Deslizamento

##### IV.3.4.1 - Equações

Basicamente são as mesmas equações da fase anterior, já que a condição nova de deslizamento, é uma condição de contorno, que será transformada em equações neste ponto.

A reação no pino é função da força normal  $N$ , e do atrito dinâmico  $fd$ .

As duas incógnitas  $F_{px}$  e  $F_{pz}$  são reduzidas a uma incógnita  $N$ , já que:

$$F_{px} = N \sin \theta - fd N \cos \theta$$

$$F_{pz} = N \cos \theta + fd N \sin \theta$$

$$\underline{F}_p = \begin{bmatrix} N & 0 & fd N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & 0 \\ -\cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \quad (IV.7)$$

Temos então 3 equações, e 4 incógnitas  $\ddot{u}_x$ ,  $\ddot{u}_z$ ,  $\dot{\omega}_y$ ,  $N$ .

Adicionalmente existe então, o movimento de deslizamento da jaqueta sobre a viga extrema, e que nos dá duas equações a mais, e uma incógnita adicional, que nos deixa com 5 incógnitas e 5 equações.

Esta equação é da forma da equação (IV.6):

$$\ddot{u}_J = \dot{\omega} (\rho_G - \rho_p) + \omega^2 (\rho_G - \rho_p) + 2\omega \cdot \underline{V} \quad (IV.8)$$

em que  $\ddot{V}$  é a aceleração linear da jaqueta segundo a viga extrema relativa à direção de movimento.

#### IV.3.4.2 - Condições de Contorno

São as mesmas condições do ponto IV.3.3.2, só que o movimento passa para a fase seguinte, quando a jaqueta deixa a viga de rotação, e entra na água até alcançar a posição de equilíbrio estático.

Na posição da Figura (IV.2a) temos então:

a) Rotação em torno de  $P$ .

b) Relação entre  $\ddot{u}$  e  $\omega$

$$\ddot{u} = \dot{\omega} \times \underline{\rho} + \omega \times (\omega \times \underline{\rho}) \quad \text{com} \quad \underline{\rho} = \underline{\rho}_G - \underline{\rho}_P$$

$$\therefore \ddot{u} = \dot{\omega} (\underline{\rho}_G - \underline{\rho}_P) + \omega^2 (\underline{\rho}_G - \underline{\rho}_P)$$

No caso da Figura (IV.2b) e (IV.2c) temos analogamente:

a) Rotação segundo  $P$ , e translação seguindo a superfície de contato.

b) Relação entre  $\ddot{u}$ ,  $\omega$ ,  $V$ :

$$\ddot{u} = \dot{\omega} \times \underline{\rho} + \omega \times (\omega \times \underline{\rho}) + 2\omega \times \underline{V} \quad \text{com} \quad \underline{\rho} = \underline{\rho}_G - \underline{\rho}_P$$

$\underline{V}$  = velocidade de deslizamento da jaqueta relativa aos eixos fixos, na direção da viga de rotação.

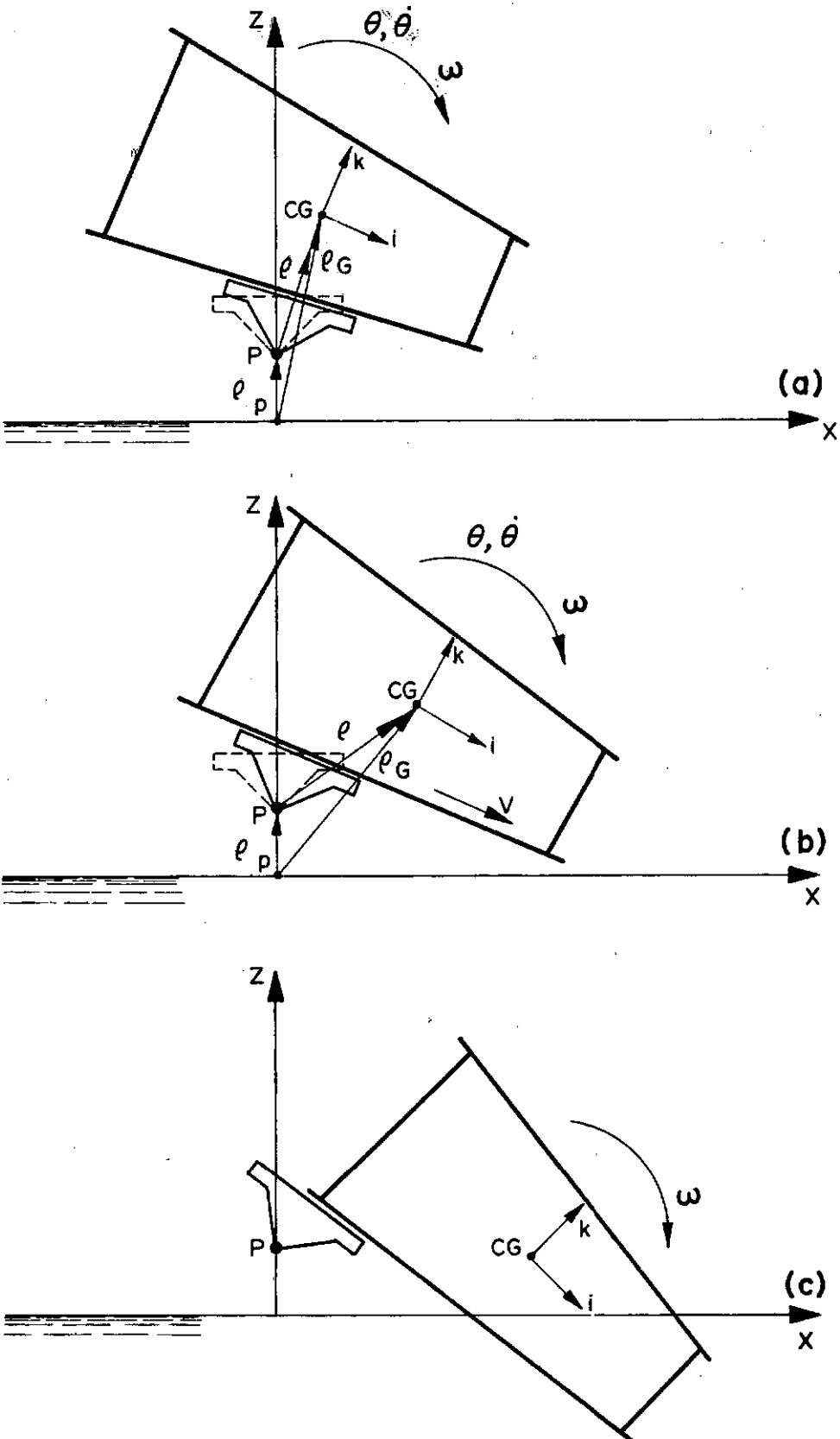


FIG. IV-2



### IV.3.5 - Fase 5 - Entrada na Água

#### IV.3.5.1 - Equações

São as mesmas equações da fase anterior, só que mudam as condições de contorno.

#### IV.3.5.2 - Condições de Contorno

Para este caso, a estrutura deixa a barcaça, então temos:

- Reação no pino da viga  $F_p = 0$
- Momento no pino da viga  $M_p = 0$
- Atrito nulo  $f_s = f_d = 0$
- Verificar se o afundamento da estrutura é admissível, ou seja, a estrutura não bate no fundo.
- Posição final da estrutura, ou seja até que  $\ddot{u} = \dot{u} = 0$  e/ou  $\dot{\omega} = \omega = 0$  considerando os 3 graus de liberdade da estrutura.

Foi apresentada nesta parte a análise, correspondente a corpo rígido no movimento plano e bidimensional, considerando a barcaça fixa.

Entraremos, agora, ao caso mais completo, considerando a barcaça móvel, e ligando os dois corpos por condições de contorno entre as vigas de lançamento.

### IV.4 - Barcaça Móvel

O que já foi desenvolvido no caso de movimento plano da jaqueta com a barcaça móvel, será de utilidade nesta análise.

## IV.4.1 - Fase 2 - Deslizamento da Jaqueta

## IV.4.1.1 - Equações

Neste caso as equações correspondem às equações completas de dois corpos em movimento segundo referido na Figura IV.3, ligados apenas nas vigas de deslizamento, sendo válidas então as equações (III.10) a (III.16):

$$\left( \underline{m}_J + \Sigma \underline{m}_{ai} \right) \ddot{\underline{u}}_J = \underline{F}_{dJ} + \underline{B}_J + \underline{W}_J + \underline{F}_p + \underline{R} \quad (\text{IV.9})$$

$$\left( \underline{I}_J + \Sigma \underline{I}_{ai} \right) \dot{\underline{\omega}}_J = \underline{M}_{FdJ} + \underline{M}_{BJ} + \underline{M}_{wJ} + \underline{M}_p + \underline{d}_J \times \underline{F}_p \quad (\text{IV.10})$$

$$\left( \underline{m}_B + \underline{m}_{aB} \right) \ddot{\underline{u}}_B = \underline{F}_{dB} + \underline{B}_B + \underline{W}_B - \underline{F}_p \quad (\text{IV.11})$$

$$\left( \underline{I}_B + \underline{I}_{aB} \right) \dot{\underline{\omega}}_B = \underline{M}_{dB} + \underline{M}_{BB} + \underline{M}_{wB} - \underline{M}_p - \underline{d}_B \times \underline{F}_p \quad (\text{IV.12})$$

Como o movimento é plano, então temos do ponto IV.2:

$$\begin{array}{lll} \text{JAQUETA: } \theta_i = 0 & \omega_i = 0 & , \quad u_i \neq 0 \\ \theta_j \neq 0 \implies \omega_j \neq 0 & \text{e } u_j = 0 \implies \dot{u}_j = \ddot{u}_j = 0 \\ \theta_k = 0 & \omega_k = 0 & u_k \neq 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} \text{BARÇAÇA: } \theta_x = 0 & \omega_x = 0 & u_x \neq 0 \\ \theta_y \neq 0 \implies \omega_y \neq 0 & \text{e } u_y = 0 \implies \dot{u}_y = \ddot{u}_y = 0 \\ \theta_z = 0 & \omega_z = 0 & u_z \neq 0 \end{array}$$

As incógnitas destas equações são:

$$\ddot{\underline{u}}_J = \begin{pmatrix} \ddot{u}_i \\ 0 \\ \ddot{u}_k \end{pmatrix} \quad \dot{\underline{\omega}}_J = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\omega}_j \\ 0 \end{pmatrix} \quad \ddot{\underline{u}}_B = \begin{pmatrix} \ddot{u}_x \\ 0 \\ \ddot{u}_z \end{pmatrix} \quad \dot{\underline{\omega}}_B = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\omega}_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

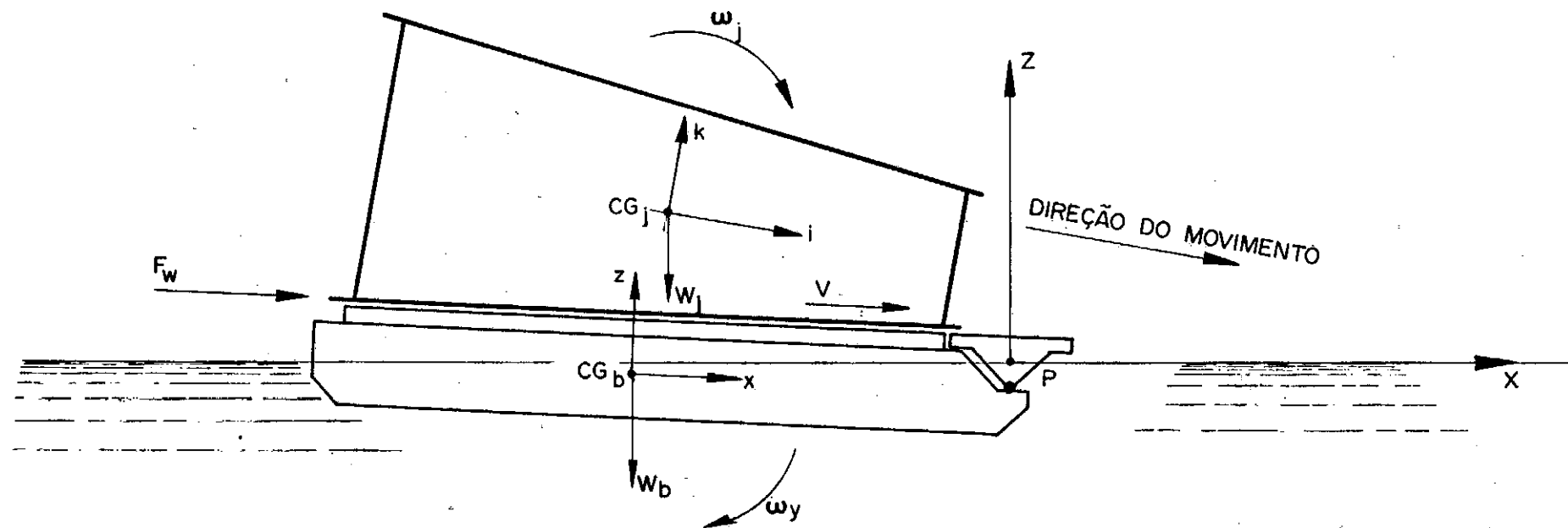


FIG. IV-3

$$\underline{\tilde{F}}_p = \begin{pmatrix} F_x \\ 0 \\ F_z \end{pmatrix} \quad \underline{\tilde{M}}_p = \begin{pmatrix} 0 \\ M_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

Temos um total de 9 incógnitas, para resolver com 6 equações, precisamos então de mais 3 equações, que devem sair das condições de contorno.

Como temos dois corpos em movimento, a relação entre as acelerações dos dois corpos pode ser encontrada considerando o movimento relativo entre ambos:

$$\underline{\ddot{u}}_J = \underline{\ddot{u}}_B + \dot{\underline{\omega}}\rho + \underline{\omega}^2\rho + 2\omega \underline{V} \quad (\text{IV.13})$$

$\underline{\rho}$  = distância entre  $CG_J$  e  $CG_B$

$\underline{V}$  = velocidade relativa entre jaqueta e barcaça segundo a viga de deslizamento.

Introduzimos mais 3 equações, mas também, introduzimos  $\underline{V}$  com duas incógnitas, ou seja, são 9 equações e 11 incógnitas.

#### IV.4.1.2 - Condições de Contorno

Como o movimento entre jaqueta e barcaça não é independente, e estão ligadas através das vigas de lançamento com um movimento conjunto, então as rotações são iguais até o momento em que a viga extrema começa a girar.

$$\therefore \theta_j = \theta_z \implies \omega_j = \omega_z \quad (\text{IV.14})$$

Na fase de deslizamento a jaqueta e barcaça re-

lacionam atrito e força normal entre as vigas de deslizamento:

$\underline{N}$  = vetor resultante das forças normais aplicadas

$\underline{f}$  = vetor de coeficientes de atrito estático e dinâmico

$\underline{F}_A$  = vetor de força de atrito estático e dinâmico

$$\begin{aligned}\underline{F}_s &= f_s \underline{N} \\ \underline{F}_d &= f_d \underline{N}\end{aligned}\tag{IV.15}$$

Estas equações complementam as necessidades para resolver 11 equações com 11 incógnitas.

Adicionalmente deve ser determinado quando a jaqueta alcança a viga de rotação, e quando o  $CG_J$  passa por sobre o pino de rotação da viga extrema.

Também deve ser verificado se a jaqueta começa a entrar na água para considerar as forças  $\underline{F}_{dJ}$ ,  $\underline{B}_J$ , e as massas adicionadas.

#### IV.4.2 - Fase 3 - Rotação na Viga Extrema (Gangorra)

##### IV.4.2.1 - Equações

Neste caso as equações (IV.9) a (IV.12), continuam válidas, assim como as condições de movimento plano, e o número de incógnitas equações originais. Ver Figura (IV.4).

As únicas coisas que mudam são as condições de contorno e a relação entre as acelerações, já que agora o deslizamento, é uma rotação, e o movimento relativo já não pode

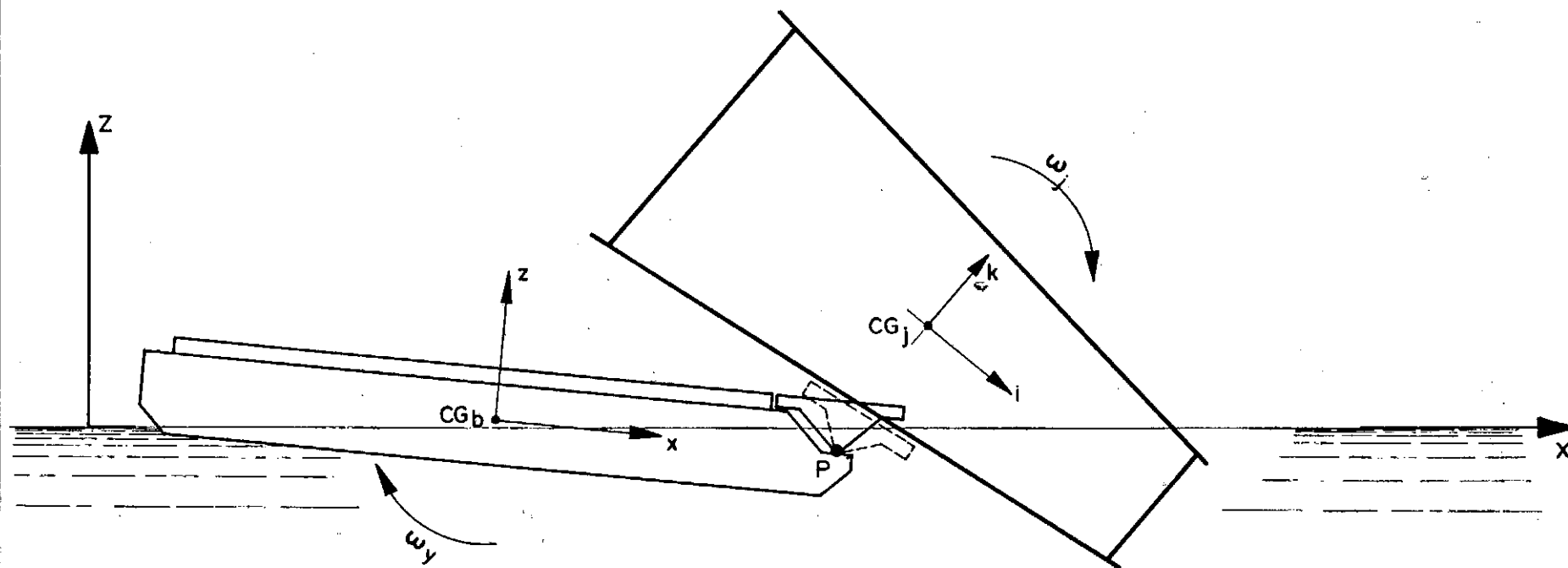


FIG. IV-4

ser representado pela equação (IV.13), se não por meio da seguinte relação:

$$\ddot{\underline{u}}_J = \ddot{\underline{u}}_B + \dot{\underline{\omega}}_J \underline{\rho}_1 + \underline{\omega}_J^2 \underline{\rho}_1 + \dot{\underline{\omega}}_B \underline{\rho}_2 + \underline{\omega}_B^2 \underline{\rho}_2 \quad (\text{IV.16})$$

com  $\underline{\rho}_1$  = vetor entre  $CG_J$  e  $P$

$\underline{\rho}_2$  = vetor entre  $P$  e  $CG_B$ , são então 8 equações e 9 incógnitas.

#### IV.4.2.2 - Condições de Contorno

Neste caso, as rotações são diferentes, mas pode ser considerado que o pino não tem atrito durante a rotação, e:

$$\underline{M}_P = \underline{0}$$

temos assim 8 equações e 8 incógnitas para a solução do problema, e a condição matemática está completa.

Deve ser verificado o instante de entrada da jaqueta na água, para considerar as forças hidrodinâmicas, ou seja, quando a estrutura corta a linha da água.

Adicionalmente deve-se controlar os ângulos de rotação para prevenir a batida da estrutura no convés da barcaça ("lifting").

Finalmente temos a condição de rotação e deslizamento sobre a viga de rotação, que deve ser detectada para entrar na fase seguinte, e modificar as equações de movimento: A condição limite é:

$$\underline{F}_A \leq f \underline{N} \quad \text{na direção da viga de rotação.}$$

### IV.4.3 - Fase 4 - Rotação e Deslizamento

#### IV.4.3.1 - Equações

Este caso é similar ao anterior, as equações (IV.9) a (IV.12) continuam válidas, assim como as condições de movimento plano, e o número de incógnitas e equações originais.

Analogamente, só mudam as condições de contorno e as características do movimento, já que além das acelerações angulares diferentes, temos o deslizamento da jaqueta sobre a viga extrema, e a equação (IV.16) se transforma em:

$$\ddot{u}_J = \ddot{u}_B + \dot{\omega}_J \rho_1 + \omega_J^2 \rho_1 + \dot{\omega}_B \rho_2 + \omega_B^2 \rho_2 + 2\omega \underline{V} \quad (\text{IV.17})$$

#### IV.4.3.2 - Condições de Contorno

Analogamente, podemos considerar que  $M_p = 0$  ou que a influência da velocidade  $V$  não produz reações de momento importantes no pino da viga extrema.

Outra condição importante é saber exatamente o instante que a jaqueta deixa a viga extrema e entra completamente na água até chegar à máxima profundidade e alcançar o equilíbrio estático de flutuação. Esta condição é determinada pela trajetória de alguns pontos característicos da jaqueta.

### IV.4.4 - Fase 5 - Entrada na Água

#### IV.4.4.1 - Equações

As equações continuam válidas, só mudam as condições de contorno.



#### IV.4.4.2 - Condições de Contorno

São as mesmas condições do ponto IV.3.5.2, só que adicionando o movimento da barcaça até a posição de equilíbrio flutuante com:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_B &= \omega_B = 0 \\ \text{e/ou} \\ \dot{u}_B &= \ddot{u}_B = 0 \end{aligned}$$

#### IV.5 - Formulação Matricial

Nós parágrafos anteriores foi desenvolvida uma formulação Bidimensional para movimentos de dois corpos rígidos, no plano, para cada fase do movimento, assinalando as condições de contorno de cada uma, e determinando o número de incógnitas e equações necessárias a cada passo.

Usando a teoria de matrizes, vamos desenvolver uma equação geral e as condições de contorno de cada fase.

##### IV.5.1 - *Equações Matriciais*

Considerando as equações (IV.9) a (IV.12), e usando vetores e matrizes, substituindo os valores conhecidos das expressões para cada força, temos:

$$\underline{m}_J = \begin{pmatrix} m_i & 0 \\ & m_j \\ 0 & m_k \end{pmatrix} \quad \underline{I}_J = \begin{pmatrix} I_{ii} & 0 \\ & I_{jj} \\ 0 & I_{kk} \end{pmatrix}$$

$i, j, k$  são os eixos locais da jaqueta

$$\ddot{\underline{u}}_J = \begin{pmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_j \\ \ddot{u}_k \end{pmatrix} \quad \dot{\underline{\omega}}_J = \begin{pmatrix} \dot{\omega}_i \\ \dot{\omega}_j \\ \dot{\omega}_k \end{pmatrix}$$

$$\underline{m}_{ai} = \begin{pmatrix} m_{ax} \\ m_{ay} \\ m_{az} \end{pmatrix} \quad \underline{I}_{ai} = \begin{pmatrix} I_{ax} \\ I_{ay} \\ I_{az} \end{pmatrix}, \text{ para cada barra com } x, y, z \text{ eixos locais}$$

massas associadas      momento de inércia das  
massas associadas.

$$\begin{aligned} F_{dJ} &= \sum c_{di} \frac{\rho}{2g} D_i \dot{\underline{v}}_i |\dot{\underline{v}}_i| = \sum_{i=1}^n c_{ai} \dot{\underline{u}}_i |\dot{\underline{u}}_i| \\ &= \underline{r}_d \dot{\underline{u}}_J \sum_{i=1}^n c_{ai} |\underline{r}_d \dot{\underline{u}}_J| = \underline{r}_d \dot{\underline{u}}_J |\underline{r}_d \dot{\underline{u}}_J| \sum c_{ai} \end{aligned}$$

$\underline{r}_d$  = matriz de rotação que projeta perpendicular ao membro.

$$\underline{c}_{ai} = c_{di} \frac{\rho}{2g} D_i$$

$$F_{dJ} = \begin{pmatrix} F_{di} \\ F_{dj} \\ F_{dk} \end{pmatrix} = \underline{r}_d \begin{pmatrix} \dot{u}_i \\ \dot{u}_j \\ \dot{u}_k \end{pmatrix} |\underline{r}_d \dot{\underline{u}}_J| \sum_{i=1}^n c_{ai} = \underline{c}_d \begin{pmatrix} \dot{u}_i \\ \dot{u}_j \\ \dot{u}_k \end{pmatrix}$$

$$\text{com } \underline{c}_d = |\underline{r}_d \dot{\underline{u}}_J| \sum_{i=1}^n c_{ai} \underline{r}_d$$

$$\underline{B}_J = \begin{pmatrix} B_i \\ B_j \\ B_k \end{pmatrix}$$

$$\text{com } B_{i,j,k} = \sum b_{\ell}$$

$b_{\ell}$  = flutuação de cada  
barra submersa

$$\underline{M}_{BJ} = \sum \underline{b}_\ell \underline{C}_\ell$$

$\underline{b}_\ell$  = volume de água deslocada da barra

$$\underline{b}_\ell = A \times L$$

$A$  = área de corte da barra com a linha da água

$L$  = comprimento submerso

$\underline{C}_\ell$  = coordenadas do centro de empuxo da barra

$$\underline{W}_J = \begin{pmatrix} w_i \\ w_j \\ w_k \end{pmatrix}$$

$$\underline{F}_p = \begin{pmatrix} F_{pi} \\ F_{pj} \\ F_{pk} \end{pmatrix}$$

$$\text{com } w_{i,j,k} = \sum_{\ell=1}^n w_\ell \quad w_\ell = \text{peso de cada barra}$$

$$\underline{F}_F = \begin{pmatrix} F_{Fi} \\ F_{Fj} \\ F_{Fk} \end{pmatrix}$$

$$\underline{M}_{FdJ} = \begin{pmatrix} M_{Fdi} \\ M_{Fdj} \\ M_{Fdk} \end{pmatrix}$$

$$\underline{M}_p = \begin{pmatrix} M_{pi} \\ M_{pj} \\ M_{pk} \end{pmatrix}$$

$$\underline{M}_{BJ} = \begin{pmatrix} M_{Bi} \\ M_{Bj} \\ M_{Bk} \end{pmatrix}$$

$$\underline{M}_{wJ} = \begin{pmatrix} M_{wi} \\ M_{wj} \\ M_{wk} \end{pmatrix}$$

$$\underline{d}_J \underline{F}_F = \begin{pmatrix} M_{ki} \\ M_{kj} \\ M_{kk} \end{pmatrix}$$

Como  $\underline{m}_{ai}$  e  $\underline{I}_{ai}$  estão expressas em eixos locais, temos de usar uma matriz de rotação entre o sistema  $x,y,z$  da barra e o sistema  $i,j,k$  da jaqueta, que chamaremos  $\underline{r}_o$ .

$$\underline{m}_{ai} = \underline{r}_o \underline{m}_{ai} \quad \text{e} \quad \underline{I}_{ai} = \underline{r}_o \underline{I}_{ai} + \underline{m}_{ai} \rho_{bi}^2$$

$i,j,k \quad x,y,z$

$i,j,k \quad x,y,z$

com  $\rho_{bi} = \begin{pmatrix} i_c \\ j_c \\ k_c \end{pmatrix}_i$   $i_c, j_c, k_c$  coordenadas do centro de gravidade da barra no sistema  $i, j, k$ .

$$\rho_{bi}^2 = \rho_{bi}^T \rho_{bi}$$

$$\therefore \underset{i,j,k}{I_{ai}} = \underset{x,y,z}{r_o} \underset{i,j,k}{I_{ai}} + \underset{i,j,k}{m_{ai}} \underset{i,j,k}{\rho_{bi}^T} \underset{i,j,k}{\rho_{bi}}$$

Substituindo em equações (IV.9) e (IV.10).

$$\underset{\sim}{m}_J = \underset{\sim}{m}_J + \sum_{i=1}^n \underset{\sim}{m}_{ai} = \begin{pmatrix} m_i + \sum m_{a ii} \\ m_j + \sum m_{a ij} \\ m_k + \sum m_{a ik} \end{pmatrix}$$

onde

$m_{a ii}$  significa a massa associada da barra  $i$  na direção do eixo de referência  $i$  da jaqueta; e analogamente para  $m_{a ij}$  e  $m_{a ik}$

$$\underset{\sim}{I}_J + \sum_{i=1}^n \underset{\sim}{I}_{ai} = \begin{pmatrix} I_{ii} + \sum I_{a ii} \\ I_{jj} + \sum I_{a ij} \\ I_{kk} + \sum I_{a ik} \end{pmatrix} = \underset{\sim}{I}_J$$

onde

$I_{a ii}$  significa o momento de inércia da massa associada da barra  $i$  ( $m_{ai}$ ) na direção do eixo de referência  $i$  da jaqueta; analogamente para  $I_{a ij}$  e  $I_{a ik}$ .

$$e \quad \underline{F}_{dJ} + \underline{B}_J + \underline{W}_J + \underline{F}_p = \underline{C}_d \begin{pmatrix} \dot{\underline{u}}_i \\ \dot{\underline{u}}_j \\ \dot{\underline{u}}_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_i + W_i \\ B_j + W_j \\ B_k + W_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{pi} \\ F_{pj} \\ F_{pk} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{Fi} \\ F_{Fj} \\ F_{Fk} \end{pmatrix}$$

$$= \underline{C}_d \dot{\underline{u}}_J + \underline{K}_1 + \underline{F}_p$$

$$e \quad \underline{M}_{FdJ} + \underline{M}_{BJ} + \underline{M}_{WJ} + \underline{M}_p + \underline{d}_J \times \underline{F}_p = \begin{pmatrix} M_{Fdi} + M_{Bi} + M_{wi} + M_{ki} \\ M_{Fdj} + M_{Bj} + M_{wj} + M_{kj} \\ M_{Fdk} + M_{Bk} + M_{wk} + M_{kk} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{pi} \\ M_{pj} \\ M_{pk} \end{pmatrix}$$

$$= \underline{K}_2 + \underline{M}_p$$

as equações (IV.9) e (IV.10) são da forma:

$$\begin{pmatrix} \underline{m}_J & 0 \\ 0 & \underline{I}_J \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\underline{u}}_J \\ \dot{\underline{\omega}}_J \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{C}_d & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\underline{u}}_J \\ \dot{\underline{\omega}}_J \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \underline{K}_1 & 0 \\ 0 & \underline{K}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \underline{F}_p \\ \underline{M}_p \end{pmatrix} \quad (IV.18)$$

$$\text{ou} \quad \underline{m}_O \ddot{\underline{u}} = \underline{C}_O \dot{\underline{u}} + \underline{K}_O + \underline{F}_O$$

$$\underline{m}_O \ddot{\underline{u}} + \underline{C}_O \dot{\underline{u}} + \underline{K}_O = \underline{F}_O \quad \text{em eixos locais} \quad (IV.19)$$

e que seria análoga para a barça.

Em eixos globais  $X, Y, Z$ , temos que:

$$\underline{u}_G = \underline{R}_O \underline{u}_\ell \quad \underline{R}_O \text{ matriz de rotação dos ângulos de Euler } \phi, \theta, \psi$$

rotação de  $i, j, k$  para  $X, Y, Z$ .

$$e \quad \underline{u}_G = \underline{R}_1 \underline{\omega}_\ell \quad \underline{R}_1 = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\cos \psi \sin \theta \\ 0 & 1 & \sin \psi \\ \sin \theta & 0 & \cos \psi \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$\therefore \quad \underline{m}_o \begin{pmatrix} \underline{R}_o & 0 \\ 0 & \underline{R}_1 \end{pmatrix} \ddot{\underline{u}} + \underline{C}_o \begin{pmatrix} \underline{R}_o & 0 \\ 0 & \underline{R}_1 \end{pmatrix} \dot{\underline{u}} + \underline{R}_o \underline{K}_o = \underline{R}_o \underline{F}_o$$

$$\underline{m}_{eJ} \underline{\ddot{u}} + \underline{C}_{eJ} \underline{\dot{u}} + \underline{K}_{eJ} \underline{u} = \underline{F}_{eJ} \quad \text{eixos globais} \quad (IV.20)$$

com

$$\underline{m}_{eJ} = \begin{pmatrix} \underline{m}_J & 0 \\ 0 & \underline{I}_J \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{R}_o & 0 \\ 0 & \underline{R}_1 \end{pmatrix} \quad \text{matriz de massas equivalentes da jaqueta.}$$

$$\underline{C}_{eJ} = \underline{C}_o \begin{pmatrix} \underline{R}_o & 0 \\ 0 & \underline{R}_1 \end{pmatrix} \quad \text{matriz de amortecimento equivalente da jaqueta.}$$

$$\underline{K}_{eJ} = \underline{R}_o \underline{K}_o \quad \text{matriz de forças externas da jaqueta.}$$

$$\underline{F}_{eJ} = \underline{R}_o \underline{F}_o \quad \text{vetor de forças resultantes do movimento da jaqueta.}$$

Para a barça as expressões são similares, e acoplando os dois corpos, podemos colocar:

$$\underline{M} \underline{\ddot{u}} + \underline{C} \underline{\dot{u}} + \underline{K} \underline{u} = \underline{F} \quad (IV.21)$$

equação que deve ser usada com as condições adicionais deduzidas para cada caso:

$$\text{com:} \quad \underline{M} = \begin{pmatrix} \underline{m}_{eJ} & 0 \\ 0 & \underline{m}_{eB} \end{pmatrix} \quad \underline{C} = \begin{pmatrix} \underline{C}_{eJ} & 0 \\ 0 & \underline{C}_{eB} \end{pmatrix} \quad \underline{K} = \begin{pmatrix} \underline{K}_{eJ} & 0 \\ 0 & \underline{K}_{eB} \end{pmatrix} \quad \underline{F} = \begin{pmatrix} \underline{F}_{eJ} \\ \underline{F}_{eB} \end{pmatrix}$$

$$\ddot{\underline{u}} = \begin{pmatrix} \ddot{u}_{eJ} \\ \ddot{u}_{eB} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \ddot{\underline{u}}_J \\ \dot{\underline{\omega}}_J \\ \ddot{\underline{u}}_B \\ \dot{\underline{\omega}}_B \end{pmatrix} \quad \text{mas em geral, a equação associada é da forma:}$$

$$\ddot{\underline{u}}_J = \ddot{\underline{u}}_B + \dot{\underline{\omega}}_J \underline{\rho}_1 + \underline{\omega}_J^2 \underline{\rho}_1 + \dot{\underline{\omega}}_B \underline{\rho}_2 + \underline{\omega}_B^2 \underline{\rho}_2 + 2\underline{\omega}_J \underline{V}$$

$$\text{mas} \quad \underline{\omega}^2 = \underline{\omega} \cdot \underline{\omega}^T \quad \underline{V} = \underline{R}_O \underline{V}$$

$$\ddot{\underline{u}}_J = \ddot{\underline{u}}_B + \dot{\underline{\omega}}_J \underline{\rho}_1 + \underline{\omega}_J \underline{\omega}_J^T \underline{\rho}_1 + \dot{\underline{\omega}}_B \underline{\rho}_2 + \underline{\omega}_B \underline{\omega}_B^T \underline{\rho}_2 + 2\underline{\omega}_J \underline{R}_O \underline{V} \quad (\text{IV.22})$$

#### IV.5.2 - Solução das Equações

Como a equação (IV.21) é uma equação não linear, usaremos para sua solução o método de integração direta, assumindo que a aceleração varia linearmente num intervalo  $\Delta t$  pequeno.

A aproximação mais simples é usar as Diferenças Finitas:

$$\text{seja} \quad \ddot{\underline{u}}(t) = \ddot{\underline{u}}(t + \Delta t)$$

$$\text{como da física} \quad \underline{v} = \underline{v}_O + \underline{a}t \quad \text{e} \quad \underline{x} = \underline{x}_O + \underline{v}_O t + \frac{1}{2} \underline{a}t^2$$

$$\dot{\underline{u}}(t) = \dot{\underline{u}}_O + \ddot{\underline{u}}(t) \Delta t \quad \dot{\underline{u}}_O = \dot{\underline{u}}(t = t_O) \quad (\text{IV.23})$$

$$\underline{u}(t) = \underline{u}_O + \dot{\underline{u}}_O \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{\underline{u}}(t) \Delta t^2$$

Substituindo (IV.23) em (IV.21) e recordando que as matrizes devem ser avaliadas em  $t = t_O$ :

$$\underline{M}_0 \ddot{\underline{u}}(t) + \underline{C}_0 \left( \dot{\underline{u}}_0 + \ddot{\underline{u}}(t) \Delta t \right) + \underline{K}_0 = \underline{F}_0$$

$$(\underline{M}_0 + \underline{C}_0 \Delta t) \ddot{\underline{u}}(t) + \underline{C}_0 \dot{\underline{u}}_0 + \underline{K}_0 = \underline{F}_0$$

$$\underline{M}_0^* \ddot{\underline{u}}(t) + \underline{C}_0 \dot{\underline{u}}_0 + \underline{K}_0 = \underline{F}_0 \quad \text{com} \quad \underline{M}_0^* = \underline{M}_0 + \underline{C}_0 \Delta t$$

$$\underline{M}_0^* \ddot{\underline{u}}(t) = - \underline{C}_0 \dot{\underline{u}}_0 + (\underline{F}_0 - \underline{K}_0)$$

$$\ddot{\underline{u}}(t) = (\underline{M}_0^*)^{-1} \left( - \underline{C}_0 \dot{\underline{u}}_0 + \underline{F}_0 - \underline{K}_0 \right) \quad (\text{IV.24})$$

com  $\ddot{\underline{u}}(t)$ , calculamos  $\dot{\underline{u}}(t)$  e  $\underline{u}(t)$ , e introduzimos estes valores em (IV.21) para calcular  $\ddot{\underline{u}}(t)$  e comparar os dois valores, para assegurar a convergência.



## CAPÍTULO V

## V - MODELO APLICADO A UMA JAQUETA SIMPLIFICADA

V.1 - Modelo Matemático

Como primeiro passo na aplicação das formulações discutidas acima, e com o objetivo de implementar uma ferramenta computacional adequada para uma rápida avaliação do fenômeno de lançamento, será desenvolvido um modelo matemático simplificado, baseado na teoria dos capítulos anteriores.

Para tanto será necessário aplicar as equações já deduzidas, algumas hipóteses básicas:

- i ) A hipótese mais simples seria a de assumir que a jaqueta desliza sobre uma pista similar à utilizada no lançamento de navios ou em outras palavras, que a barcaça estaria fixa e com uma inclinação determinada.
- ii ) A segunda hipótese seria de aplicar a experiência prática de que o movimento dos dois corpos durante o lançamento é principalmente plano.
- iii) A terceira hipótese relacionada com a segunda é de que o movimento pode ser representado pelo movimento do Centro de Gravidade da jaqueta, com a massa equivalente concentrada nesse ponto.
- iv ) A quarta hipótese é aproveitar a técnica de análise utilizada na Engenharia Naval de considerar Áreas Seccionais na jaqueta ou pequenos elementos de volume.
- v ) A quinta hipótese derivada das anteriores é de considerar a força do arrasto função destas áreas seccionais e de

velocidade do C.G.

Para complementar estas hipóteses, a jaqueta se rá ainda representada pelos quatro pontos dos vértices além do C.G.

## V.2 - Equações Simplificadas do Modelo

### V.2.1 - Fase I

Usando as forças e diagramas da Figura V.1, e as equações (III.10) e (III.11), temos:

SF = atrito estático

Eq. Geral:

GE = constante gravitacional

$$A\ddot{u} + B\dot{u} + Cu + D = 0$$

$W_J$  = Peso da jaqueta

$W_{Ji}$  = Peso . sen  $\alpha$

$$\alpha = (\alpha_0 + \beta)$$

$W_{Jk}$  = Peso . cos  $\alpha$

$F_F = \mu N = SF \cdot W_{Jk} = SF \cdot \text{Peso} \cdot \cos \alpha$

$$m = \frac{\text{Peso}}{GE}$$

$$\therefore m\ddot{u} + F_F = \text{WINCH} + W_{Ji}$$

$$\therefore m\ddot{u} + \underbrace{SF \cdot \text{Peso} \cdot \cos \alpha}_{F_F} - \text{WINCH} - \underbrace{\text{Peso} \cdot \sin \alpha}_{D_1} = 0$$

$$A = m = \frac{\text{Peso}}{GE}$$

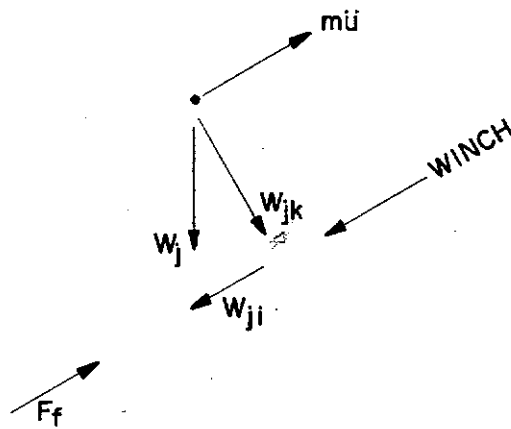
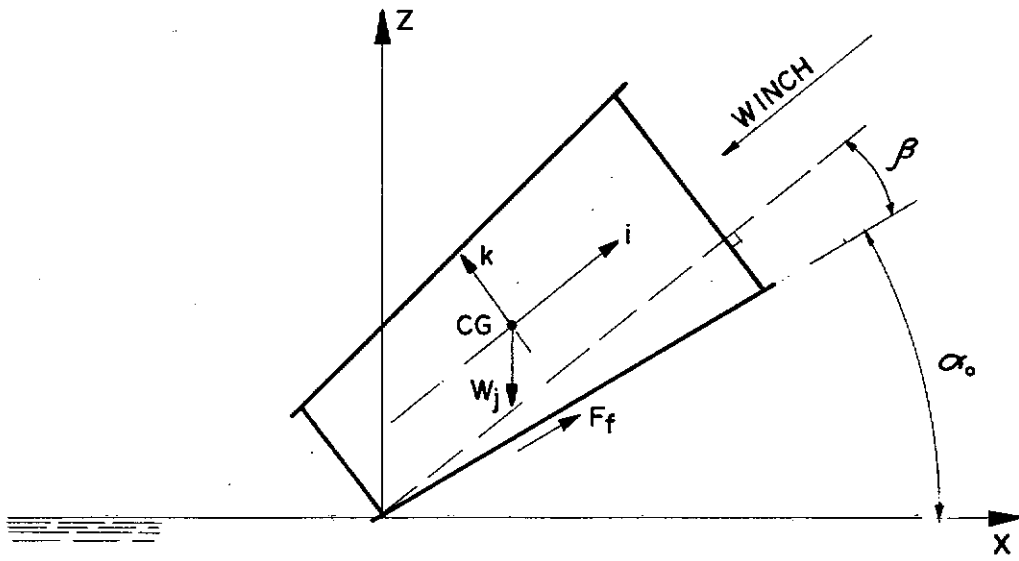
$$B = 0$$

$$C = 0$$

$$D = SF \cdot \text{Peso} \cdot \cos \alpha - \text{WINCH} - \text{Peso} \cdot \sin \alpha$$

$$D = F_F - \text{WINCH} - D_1$$

WINCH = Força externa do guincho



EQUILÍBRIO DE FORÇAS

FIG. V-1

$$\text{Programa D} = - (D_1 + \text{WINCH} - F_F)$$

$$A\ddot{u} + B\dot{u} + Cu + D = 0$$

$$\frac{\text{Peso}}{GE} \ddot{u} - (D_1 + \text{WINCH} - F_F) = 0$$

### V.2.2 - Fase II - Entrada na Água

Usando as definições da Figura V.2, temos:

$$m\ddot{u} + F_F + F_J + B_{Ji} = \text{WINCH} + W_{Ji}$$

$$F_F = \mu N = \mu (W_{Jk} - B_{Jk}) = \mu \cos \alpha (W_J - B_J)$$

$$B_{Ji} = V \sin \alpha$$

$$m\ddot{u} + \mu \cos \alpha (\text{Peso} - V) + B_o \dot{u} + V \sin \alpha = \text{WINCH} + \text{Peso} \cdot \sin \alpha$$

$$m\ddot{u} + B_o \dot{u} + \underbrace{D_F \cos \alpha (\text{Peso} - V)}_{F_F - B_K \cdot D_F} + \underbrace{V \sin \alpha}_{BI} - \underbrace{\text{Peso} \cdot \sin \alpha}_{D_1} - \text{WINCH} = 0$$

$$A = m = \frac{\text{Peso}}{GE} = A_0$$

A, B, C, D são as constantes da eq. geral

$$B = B_o = \text{DRAG} = B_o$$

$$A\ddot{u} + B\dot{u} + Cu + D = 0$$

$$C = 0 = C_o$$

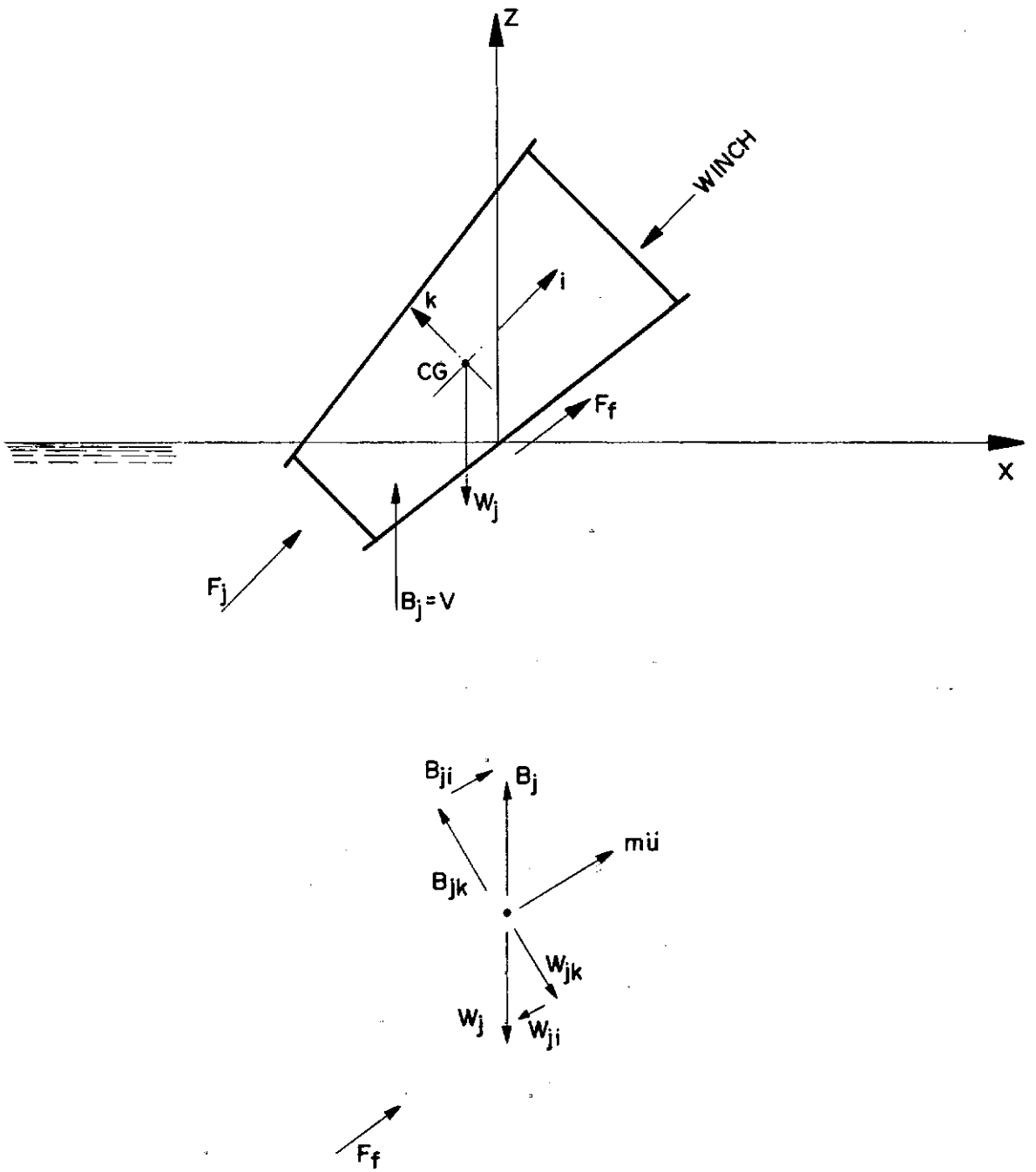
$$D = F_F - B_K \cdot D_F + B_J - D_1 - \text{WINCH}$$

$$= - (D_1 + \text{WINCH} - F_F + B_K \cdot D_F - BI) = - D_{00}$$

$$\frac{\text{Peso}}{GE} \ddot{u} + \text{DRAG} \dot{u} - (D_1 + \text{WINCH} - F_F + B_K \cdot D_F - BI) = 0$$

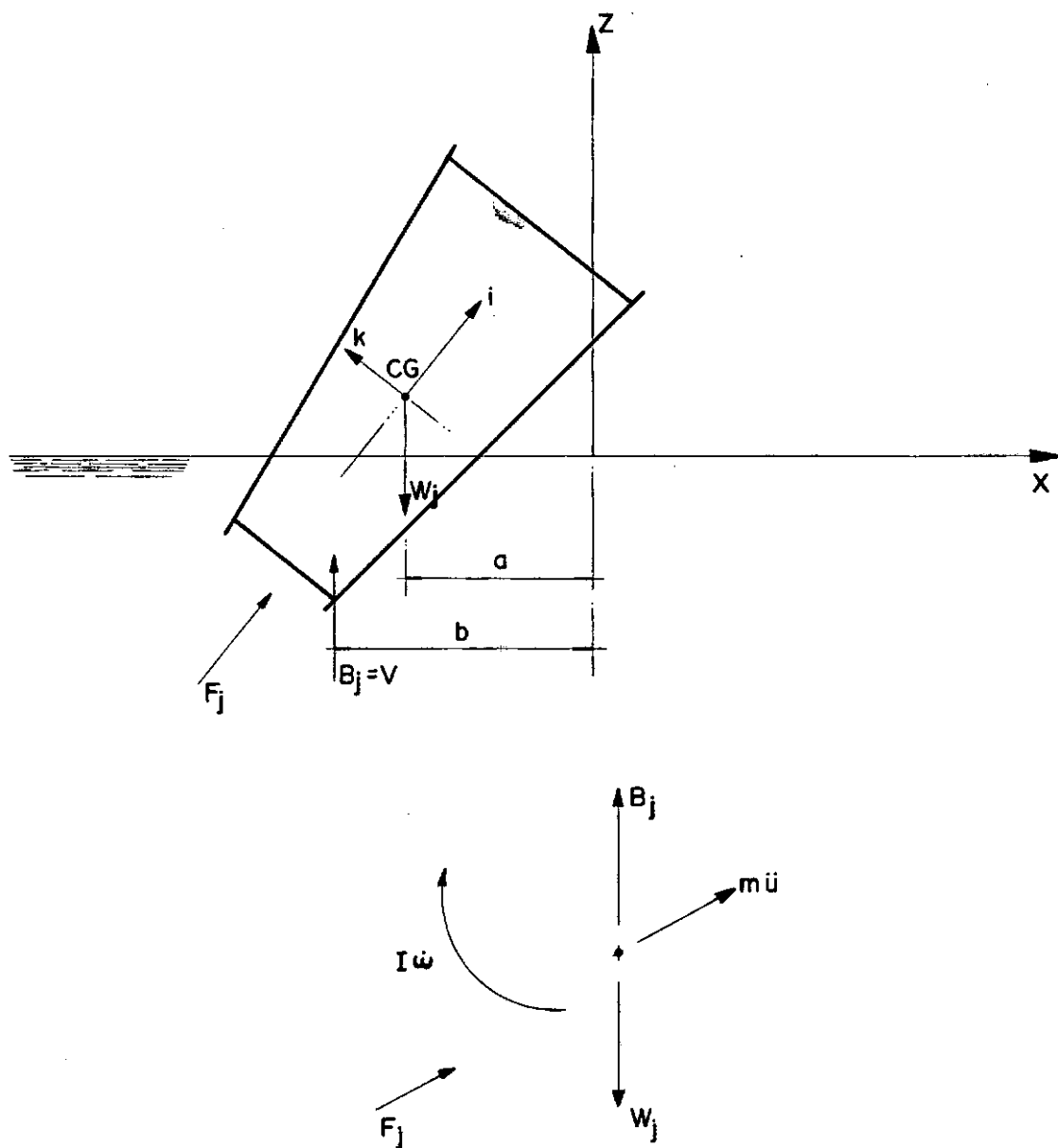
### V.2.3 - Fase III - Rotação

Usando as definições da Figura V.3, temos então as seguintes equações:



EQUILÍBRIO DE FORÇAS

FIG. V-2



EQUILIBRIO DE FORÇAS

FIG. V-3

$$I\dot{\omega} + B_J \cdot b + F_J \cdot c = W_J a$$

$$B_J = V$$

$$W_J = \text{Peso}$$

$$I\dot{\omega} + V \cdot CBI + B_O \dot{u} \cdot CBK - \text{Peso} \cdot CGI = 0$$

$$b = CBI$$

$$I\dot{\omega} + B_O \dot{u} \cdot CBK + V \cdot CBI - \text{Peso} \cdot CGI = 0$$

$$a = CGI$$

$$A\ddot{u} + B\dot{u} + Cu + D = 0$$

$$c = CBK$$

$$A = I = A2$$

$$B_O = \text{DRAG}$$

$$B = B_O \cdot CGK = B2$$

$$C = 0 = C2$$

$$D = V \cdot CBI - \text{Peso} \cdot CGI = D2$$

$$= - (\text{Peso} \cdot CGI - V \cdot CBI)$$

$$= - (AMW - AMB)$$

$$I\ddot{u} + B \cdot CGK \dot{u} - (AMW - AMB) = 0$$

#### V.2.4 - Coordenadas

Para calcular a posição da jaqueta e áreas seccionais usaremos a Figura V.4 como referência

$$X1 = CGI - a$$

$$a = c \cos (\alpha + \beta + \delta)$$

$$Y1 = CGK - b$$

$$b = c \sin (\alpha + \beta + \delta)$$

$$c = \sqrt{h_{CG}^2 + (D14/2.)^2}$$

$$X2 = X1 + D12 \cos \alpha$$

$$X3 = X4 + D34 \cos (\alpha + 2\beta)$$

$$Y2 = Y1 + D12 \sin \alpha$$

$$Y3 = Y4 + D34 \sin (\alpha + 2\beta)$$

$$X4 = X1 - D14 \sin (\alpha + \beta)$$

$$D1J = \text{distância do nó I ao nó J}$$

$$Y4 = Y1 + D14 \cos (\alpha + \beta)$$

$$CGJ, CGK \text{ coordenadas do C.G.}$$

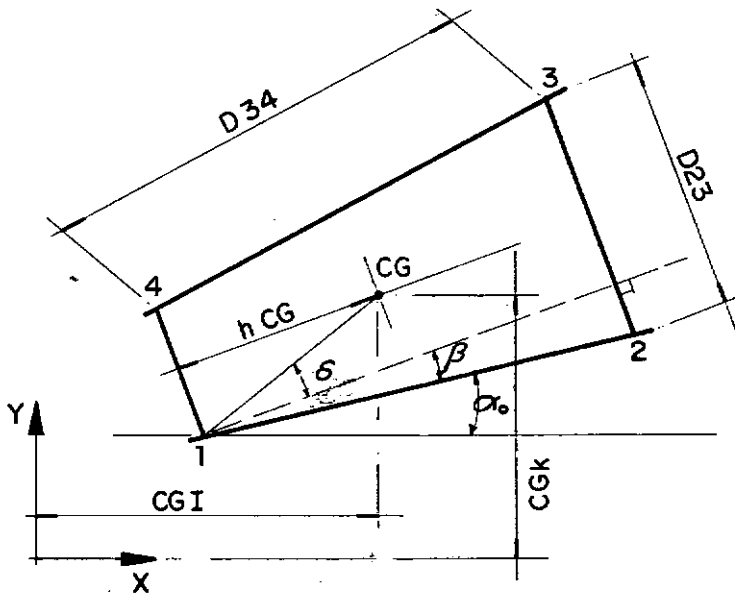


FIG. V-4

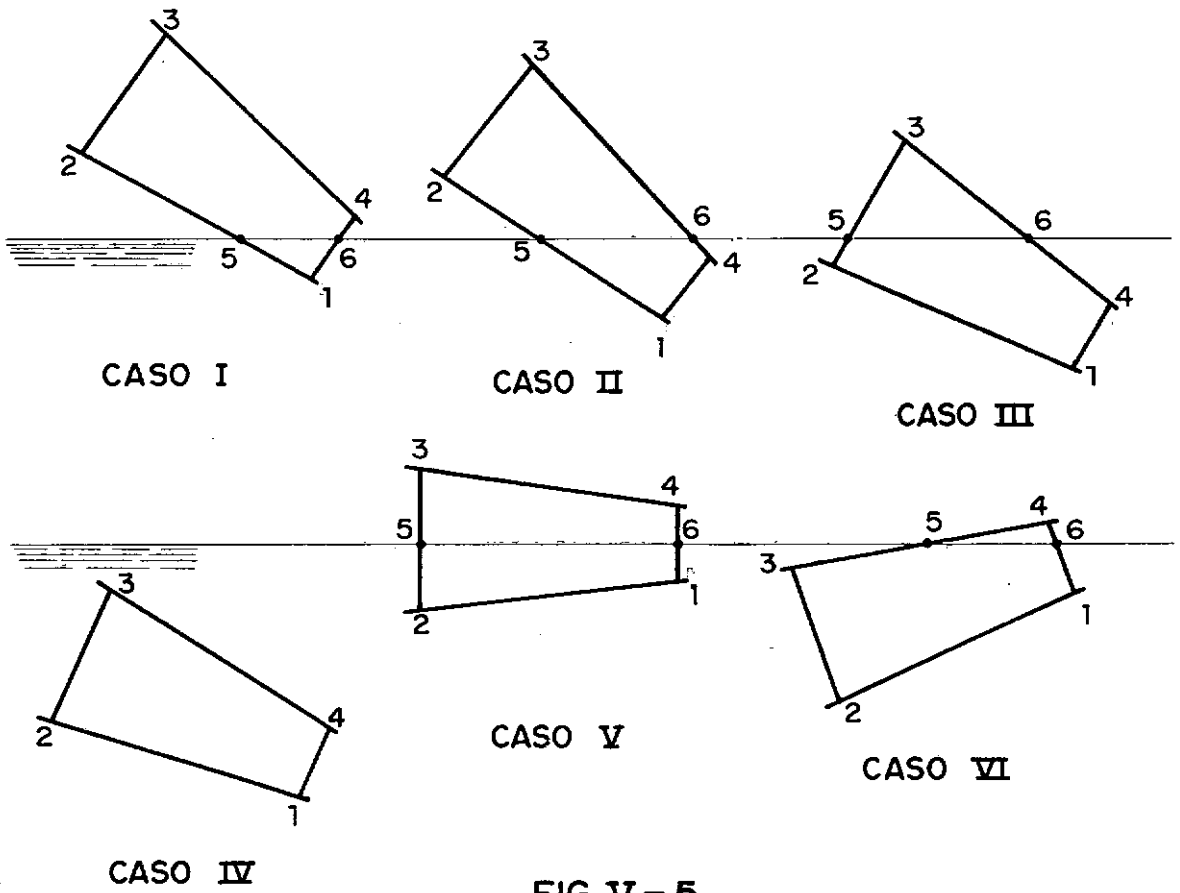


FIG. V-5



### V.2.5 - Áreas Seccionais

Com as condições da Figura V.5 que define 6 casos possíveis, e usando as equações a seguir são determinadas as áreas seccionais da jaqueta.

$z = tx + n$  eq. da reta genérica PJ, PK, coordenadas dos nós

$$\therefore T12 = \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} = \text{TANGENTE} \quad x = \frac{z - n}{t} \quad n = z - tx$$

$$T12 = \frac{PK(2) - PK(1)}{PI(2) - PI(1)} \quad EN12 = PK(2) - T12 * PI(2)$$

$$T23 = \frac{PK(3) - PK(2)}{PI(3) - PI(2)} \quad EN23 = PK(3) - T23 * PI(3)$$

$$T14 = \frac{PK(4) - PK(1)}{PI(4) - PI(1)} \quad EN14 = PK(4) - T14 * PI(4)$$

$$T34 = \frac{PK(4) - PK(3)}{PI(4) - PI(3)} \quad EN34 = PK(4) - T34 * PI(4)$$

### V.3 - Programas de Computador

Os programas detalhados são apresentados a seguir, porém neste capítulo será dado um fluxograma com uma descrição breve dos programas elaborados.

Foi utilizado um programa principal com subrotinas para calcular os diferentes passos principais do cálculo.

#### V.3.1 - Programa Principal

Este programa lê as condições iniciais, verifica a geometria e calcula as fases do processo e escreve a saída dos resultados com a posição e velocidade do C.G.

### V.3.2 - Programa DIFFIN

Este programa integra as equações diferenciais do movimento utilizando o método das diferenças finitas, obtendo-se as velocidades, deslocamentos e acelerações do C.G.

### V.3.3 - Programa POSJAC

Este programa calcula a posição do C.G. e dos 4 pontos de referência da jaqueta a partir da última posição da jaqueta.

### V.3.4 - Programa ENTRAG

Este programa calcula a posição da jaqueta quando esta entra na água, relacionando as áreas seccionais aos parâmetros de empuxo da parte submersa.

### V.3.5 - Programa MOMEN

Este programa calcula a influência dos momentos de inércia e momentos das forças no movimento angular do C.G. da jaqueta.

### V.3.6 - Programa TABLE

Este programa relaciona as áreas seccionais aos volumes submersos da jaqueta.

Finalmente relacionando estes programas segundo é indicado no bloco-diagrama a seguir, obtemos a posição, velocidade e aceleração do C.G. da jaqueta.

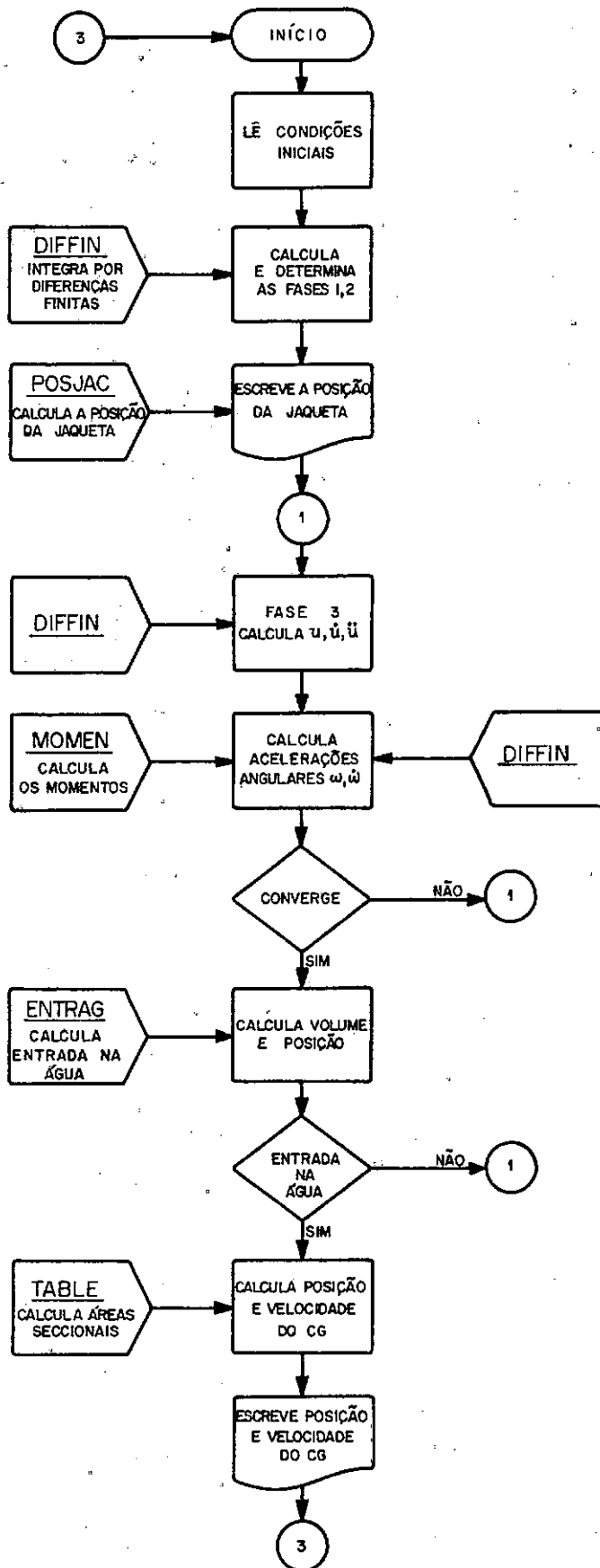


FIG. V - 6

## CAPÍTULO VI

## VI - COMPORTAMENTO NUMÉRICO DO MODELO

VI.1 - Exemplo Ilustrativo

Com o objetivo de verificar o comportamento do modelo numérico simplificado, e utilizando o programa desenvolvido, considerou-se uma jaqueta real projetada para uma lâmina d'água de 48 m com os seguintes dados característicos:

- Peso = 1604 t
- Empuxo submerso total com todos os tubos fechados = 1811 t
- Inércia (eixos principais) = 616458 t m seg<sup>2</sup>
- Coordenadas do C.G. (eixos X = - 0.40 no nível d'água com Z ver Y = - 0.88 tical) Z = - 24.44

Além desses valores foram assumidos os seguintes outros valores característicos ao fenômeno de lançamento:

- Coeficiente de atrito estático = 0.10
- Coeficiente de atrito dinâmico = 0.05
- Ângulo de deslizamento = variável

Os valores de peso, empuxo, inércia e C.G. foram obtidos do programa STRUDL modificado pela Petrobrás para Off-shore.

Estes dados foram usados porque o projeto de lançamento dessa plataforma foi executado com um programa de computador sofisticado e porque, também, existem dados do ensaio

experimental desta jaqueta e permitirão comparações teóricas e práticas.

Para a obtenção das áreas seccionais da plataforma foi usado um programa de flutuação da Petrobrás que permite obter o volume submerso de uma plataforma para qualquer nível e orientação da superfície do mar.

Desta maneira foi obtida a curva apresentada no Anexo I, relacionando volume com altura submersa.

A determinação do arrasto foi feita com o programa STRUDL através do comando Wave.

O estudo dos vários casos considerados levou a conclusão que o coeficiente de arrasto para a jaqueta estudada tinha uma variação de 1500 a 2000.

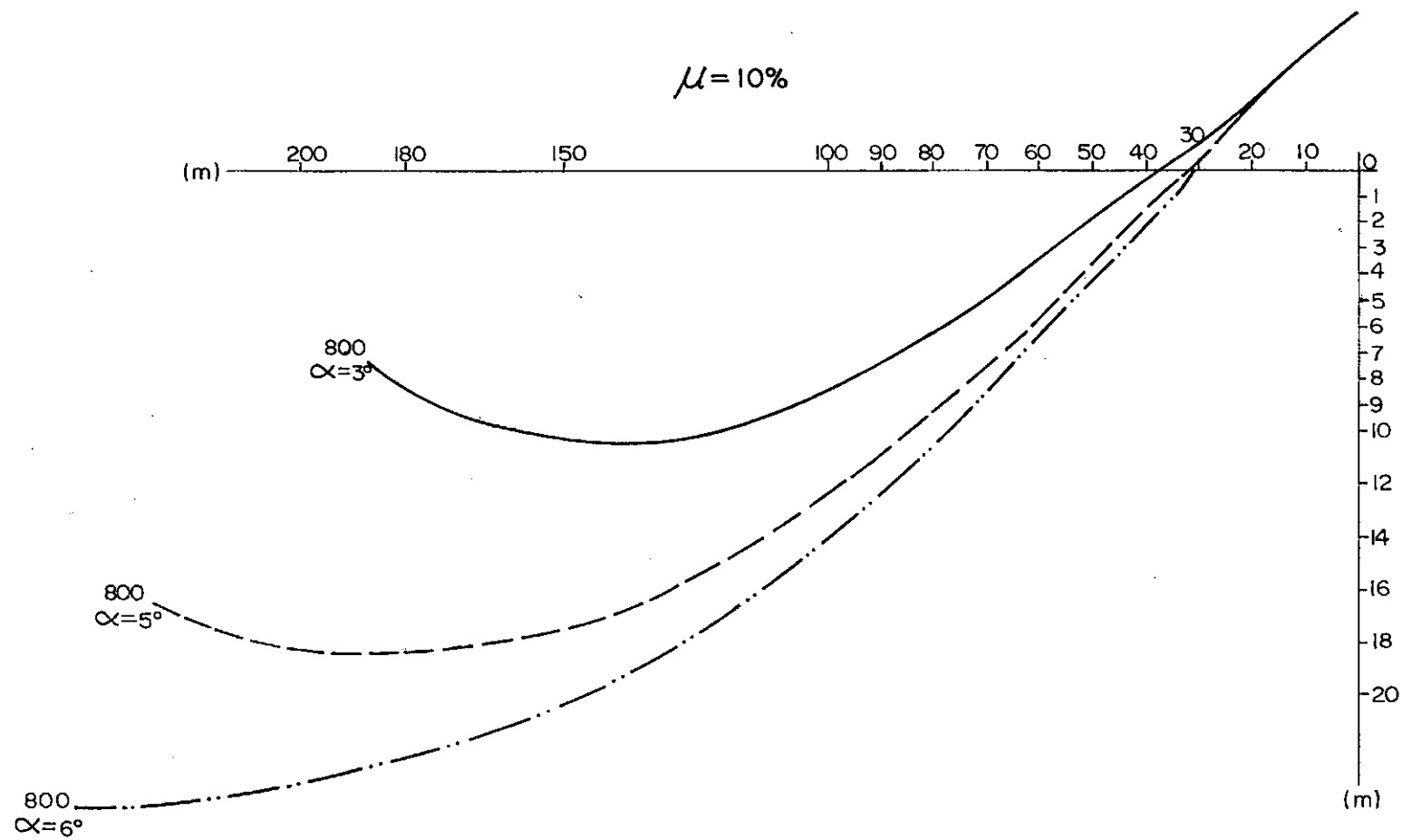
## VI.2 - Estudo Numérico

Foram realizadas diferentes rodadas, principalmente para conhecer o efeito do arrasto e do ângulo de lançamento da jaqueta.

Com os dados apresentados no item VI.1 foram realizadas diversas rodadas variando a constante de arrasto de 800 até 3000 com diversos ângulos de lançamento e diferentes atritos entre jaqueta e barcaça, mantendo fixa a barcaça.

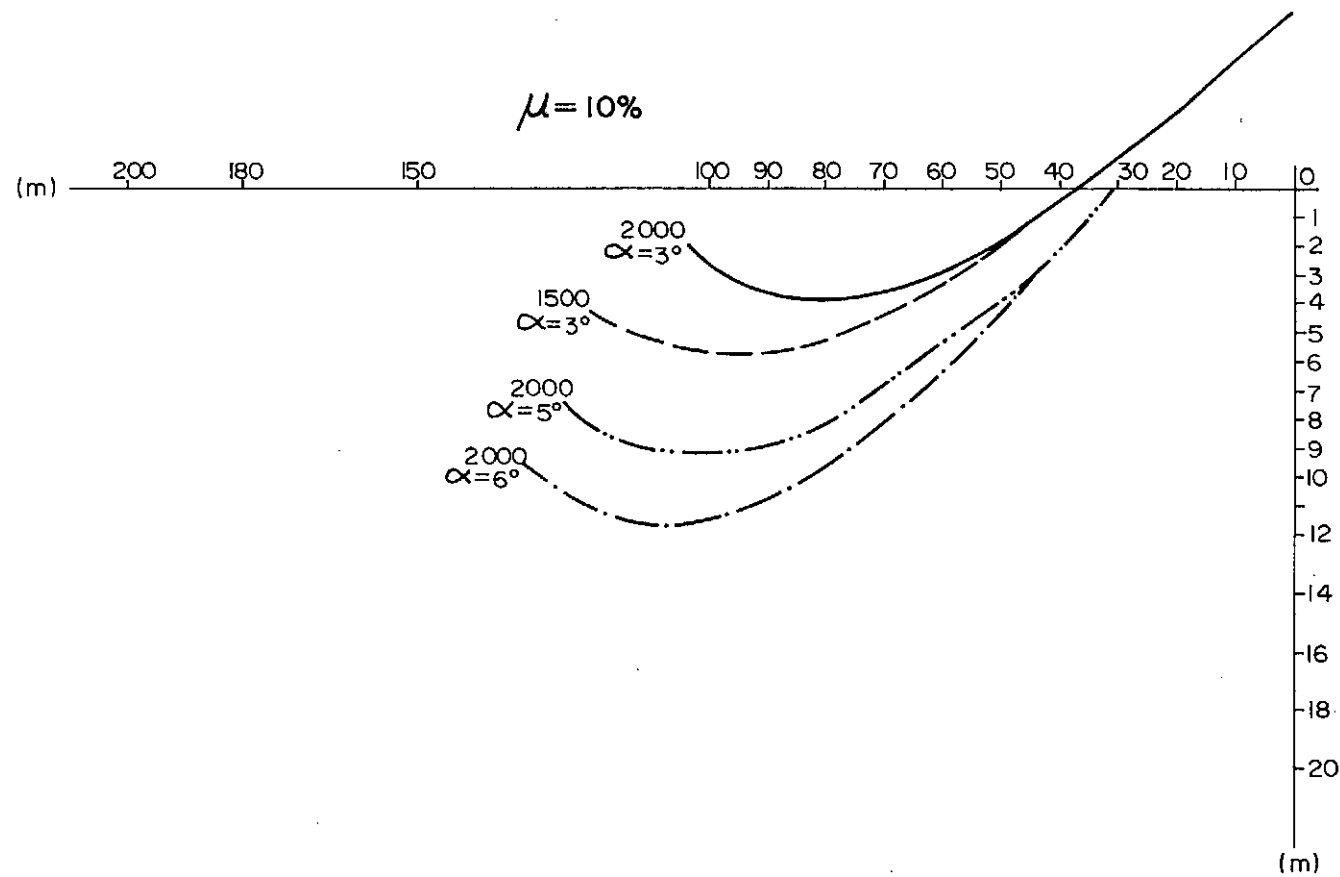
Os resultados destas rodadas de computador estão resumidos no gráfico da Figura VI.1 a VI.5.

Comparando estas curvas com as curvas do modelo reduzido e de outros programas, constata-se algumas diferenças entre os afundamentos máximos e a distância percorrida pela ja



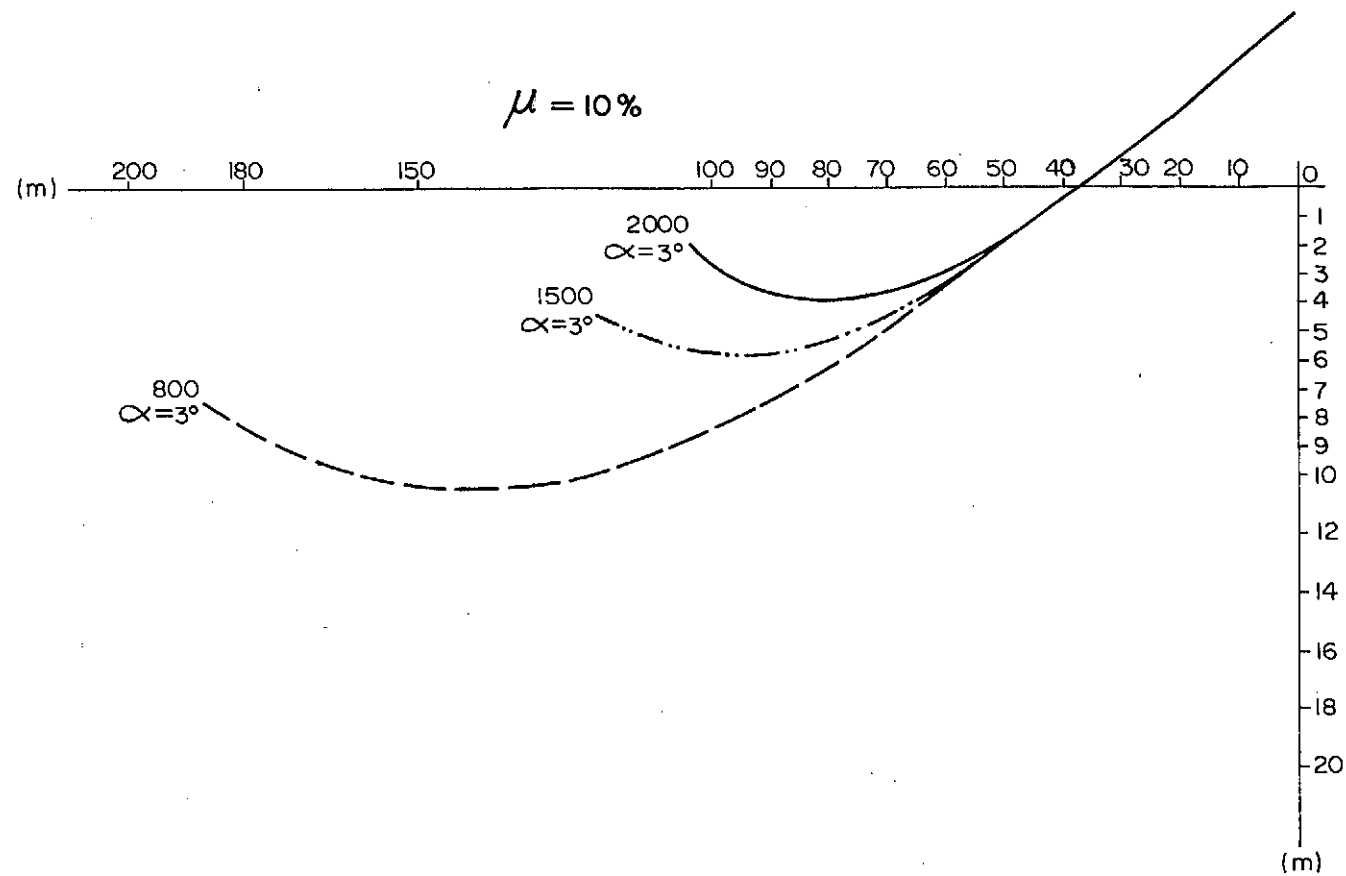
MOVIM. RELATIVO JAQUETA-BARCAÇA

FIG. VI - 1



MOVIM. RELATIVO JAQUETA-BARÇA

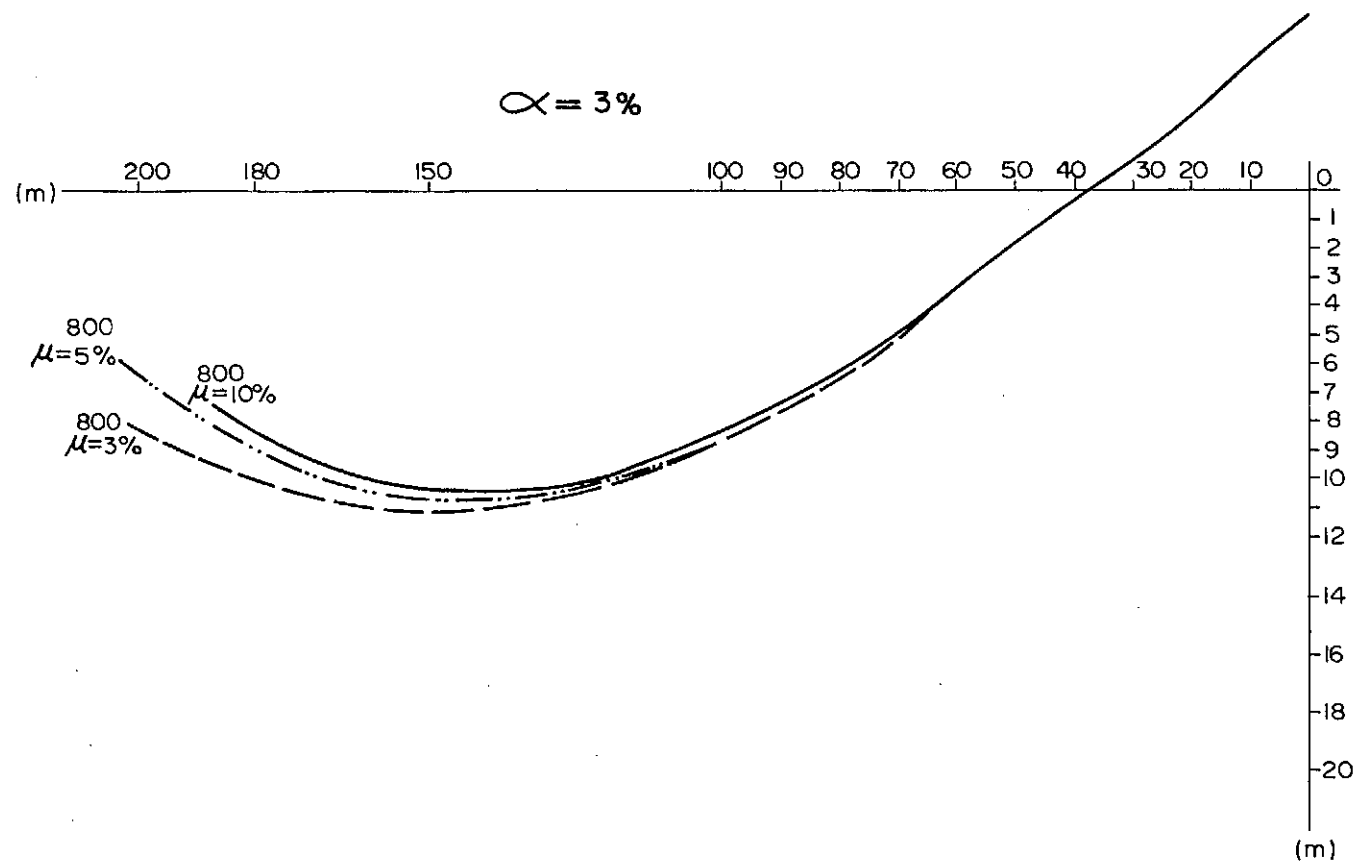
FIG. VI - 2



MOVIM. RELATIVO JAQUETA-BARCAÇA

FIG. VI - 3





MOVIM. RELATIVO JAQUETA-BARCAÇA

FIG. VI - 4

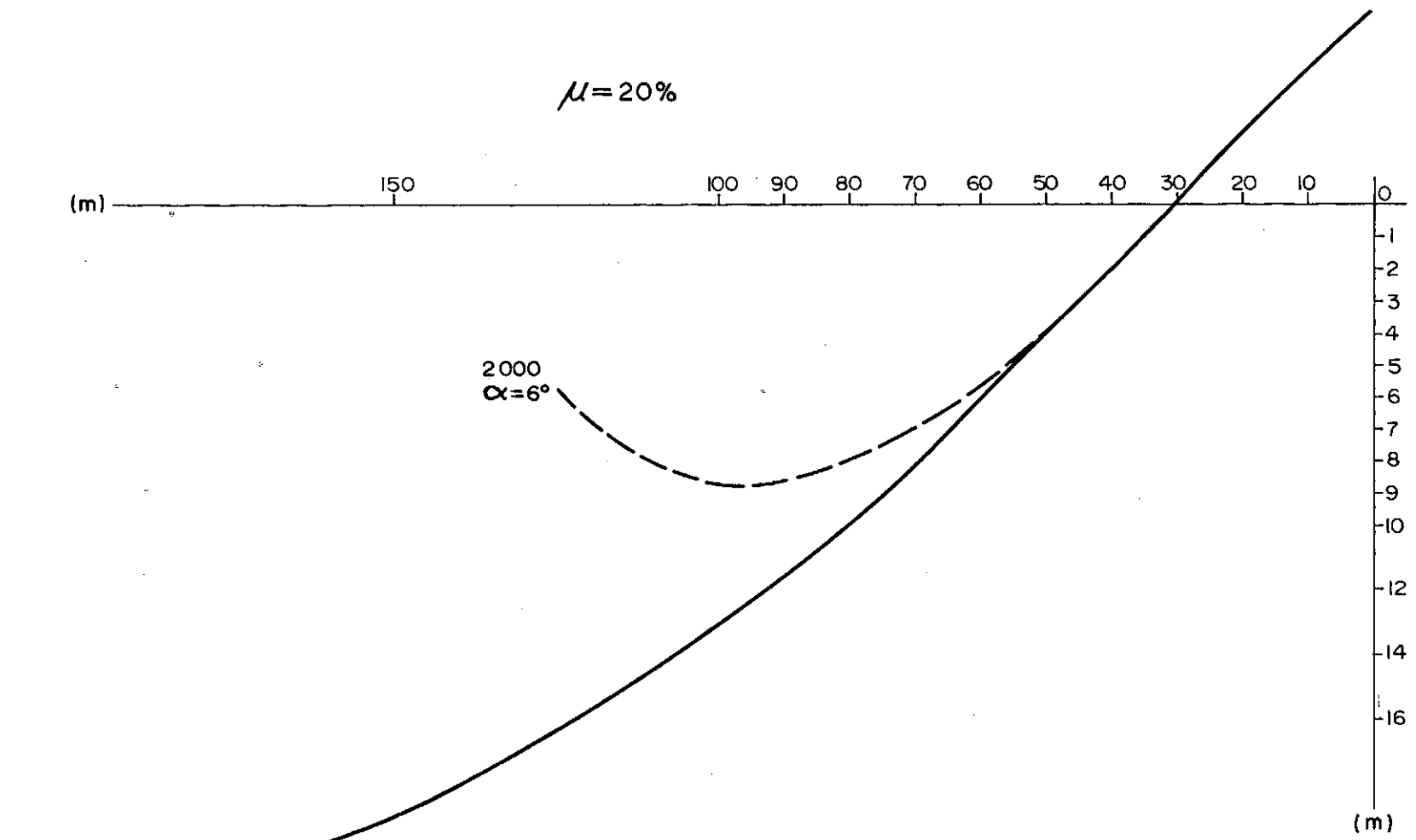


FIG. VI - 5

queta.

Sendo assim surgiu a idéia de tentar neste modelo simplificado de considerar o efeito de deslocamento de retrocesso da balsa.

Este deslocamento foi calculado partindo da relação:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2$$

com A = área da balsa que se opõe ao movimento, calculando a velocidade e deslocamentos inversos para serem deduzidos do movimento do C.G.

A área da balsa foi variada de uma rodada para outra para saber da influência desta no movimento final.

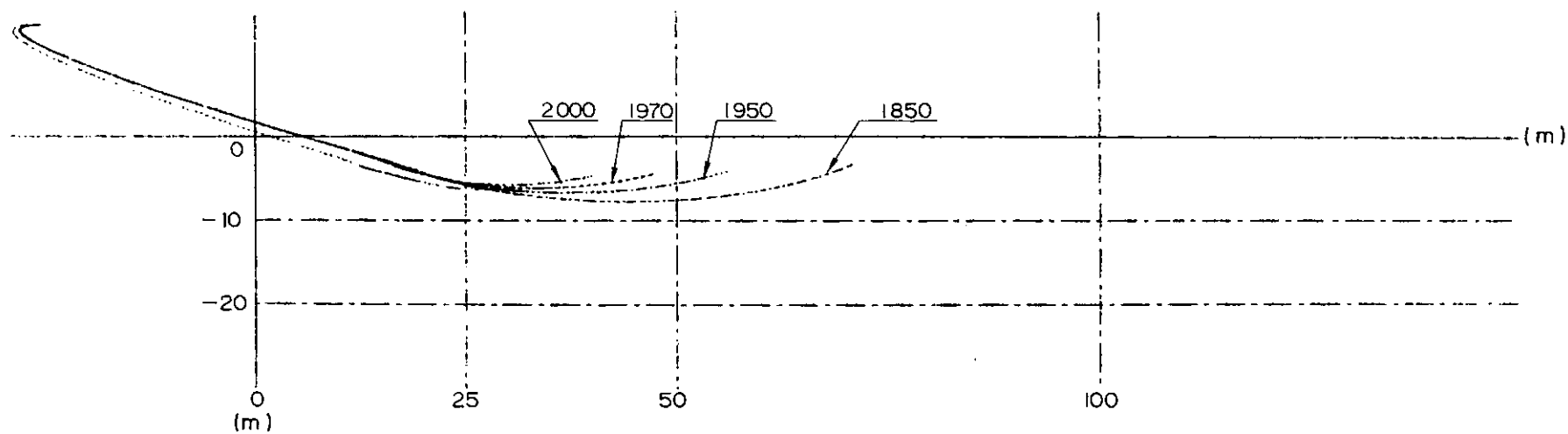
Os resultados dessas rodadas são apresentados nas Figuras VI.6 a VI.14.

O resumo dos casos estudados está incluído na Tabela VI.1.

$\rho$  = densidade da água

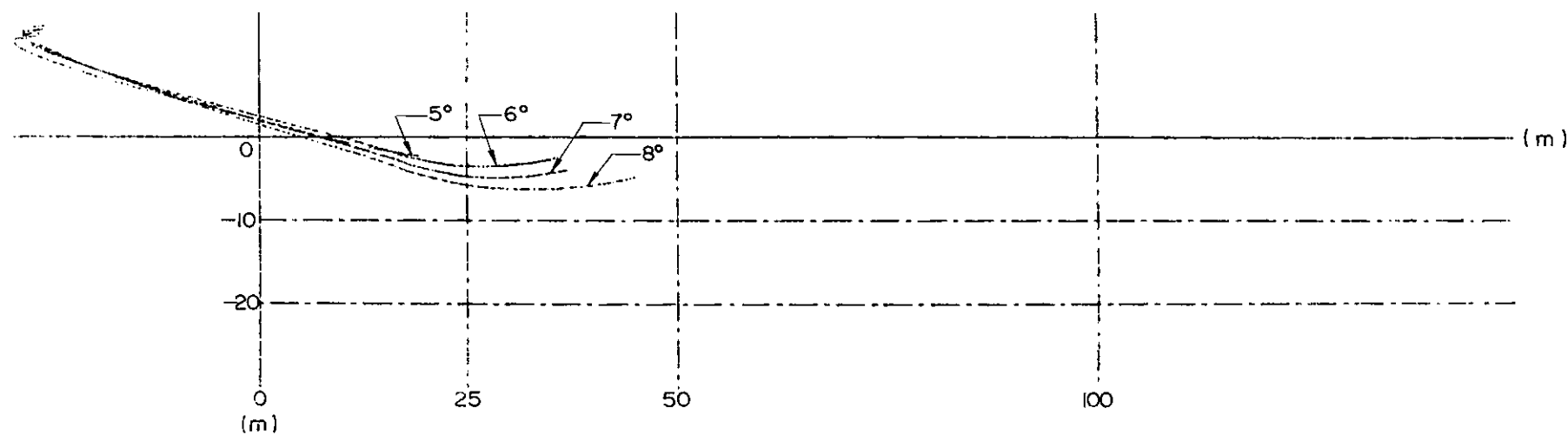
$C_d$  = coeficiente de arrasto

V = velocidade da balsa



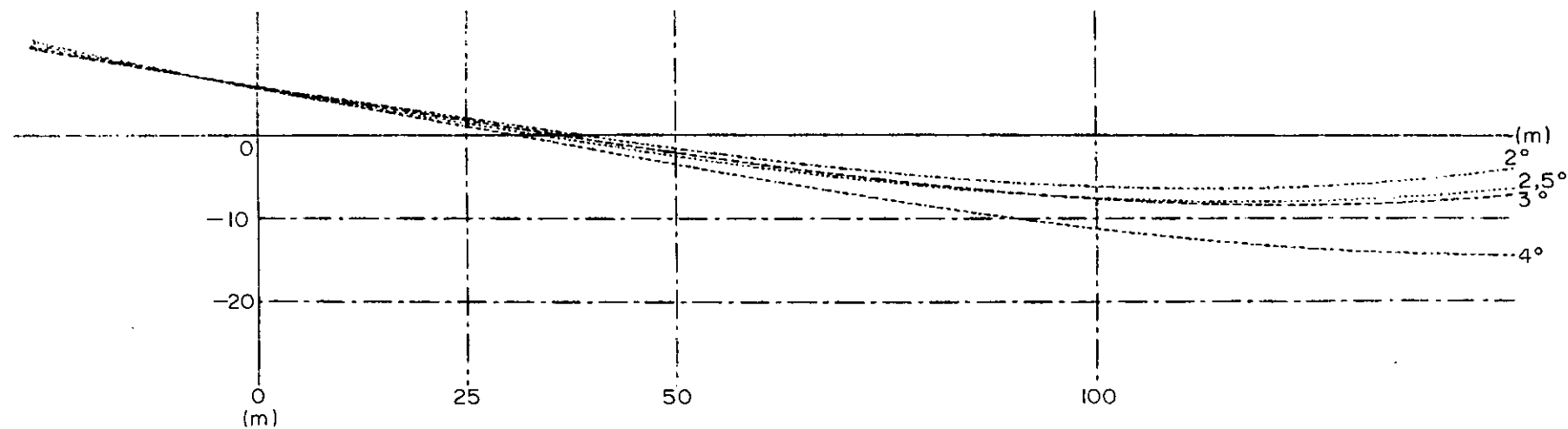
LANCAMENTO - ALFA = 8., INERCIA ROTACIONAL  $I_1$  E ALFA VARIÁVEL  
 $I_1 = 600\,000$

FIG VI - 6



LANCAMENTO - DRAG = 2000 COM ALFA VARIÁVEL E INERCIA ROTACIONAL  $I_1$   
 $I_1 = 600\,000$

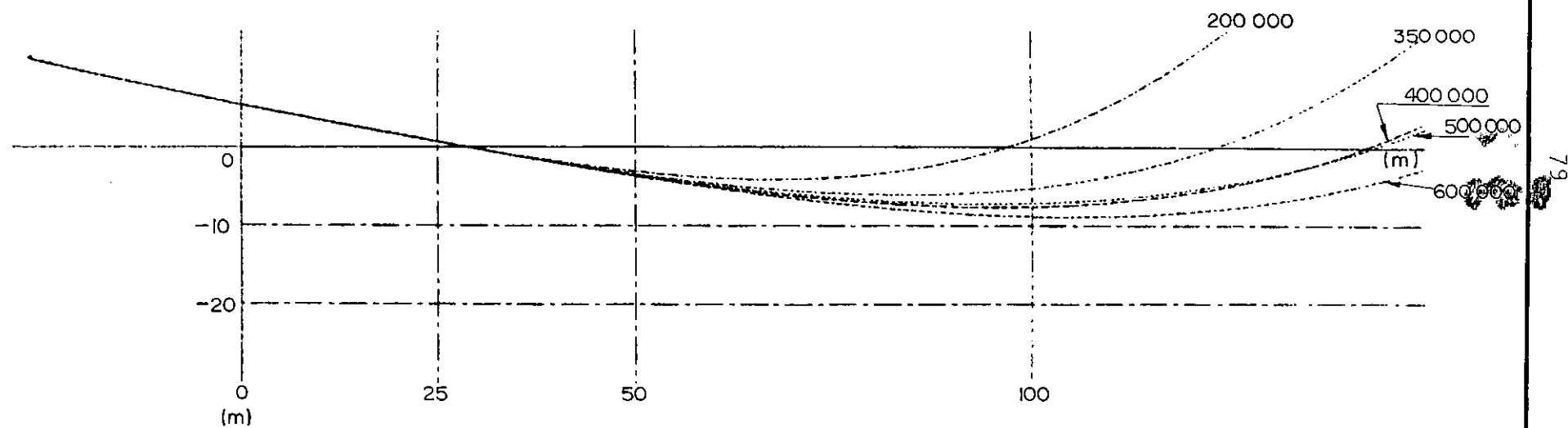
FIG. VI - 7



LANCAMENTO - DRAG = 1000 COM RESISTENCIA DA Balsa, ALFA VARIÁVEL E INERCIA I1

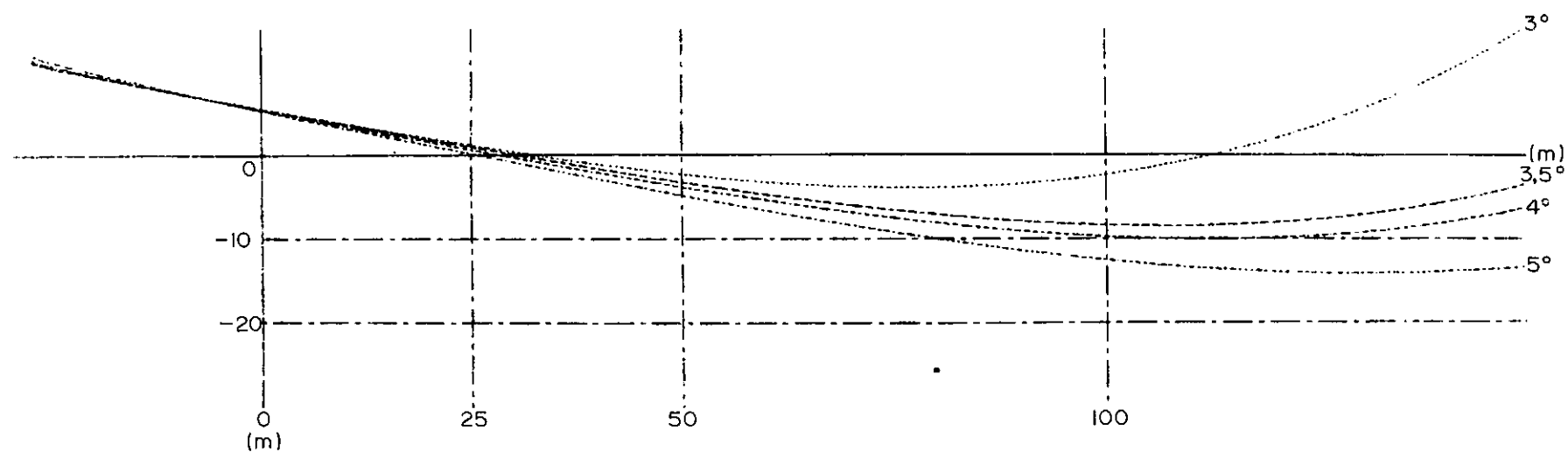
$I_1 = 600\,000$

FIG. VI - 8



LANCAMENTO - DRAG = 1500 COM RESISTENCIA DA Balsa, ALFA = 4 E INERCIA VARIAVEL

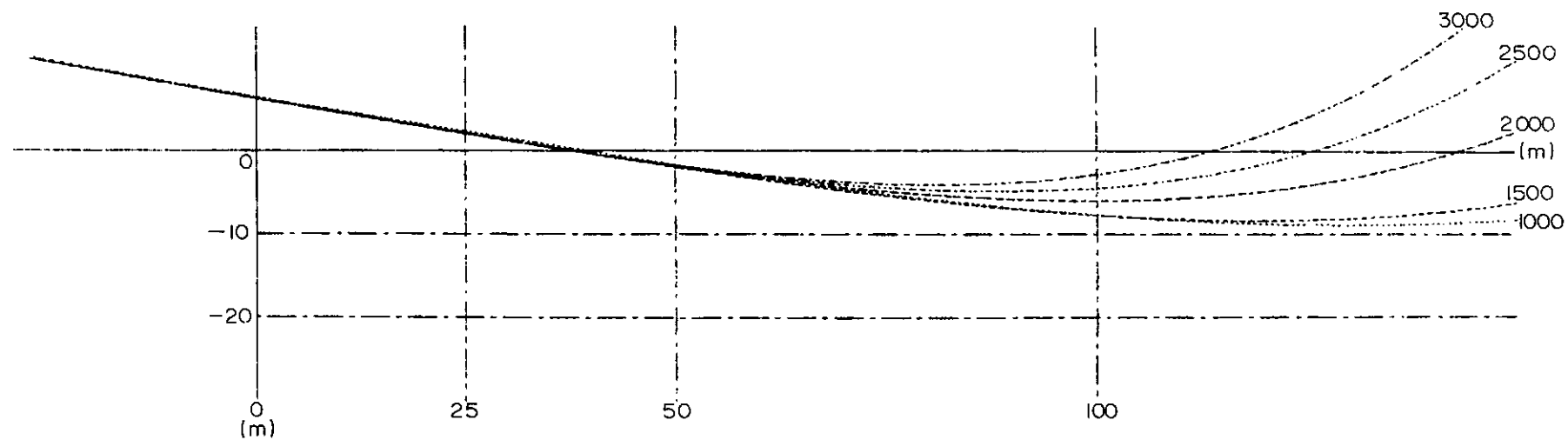
FIG. VI - 9



LANCAMENTO - DRAG = 1500. COM RESISTENCIA BALSA, ALFA VARIÁVEL E INERCIA  $I_1$   
 $I_1 = 600\ 000$

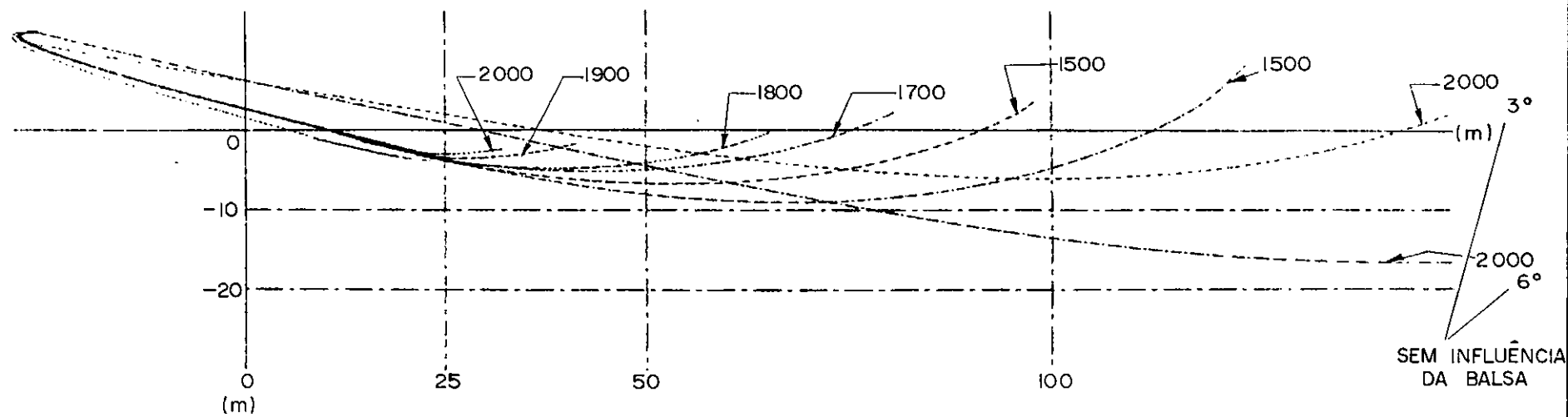
FIG. VI - 10





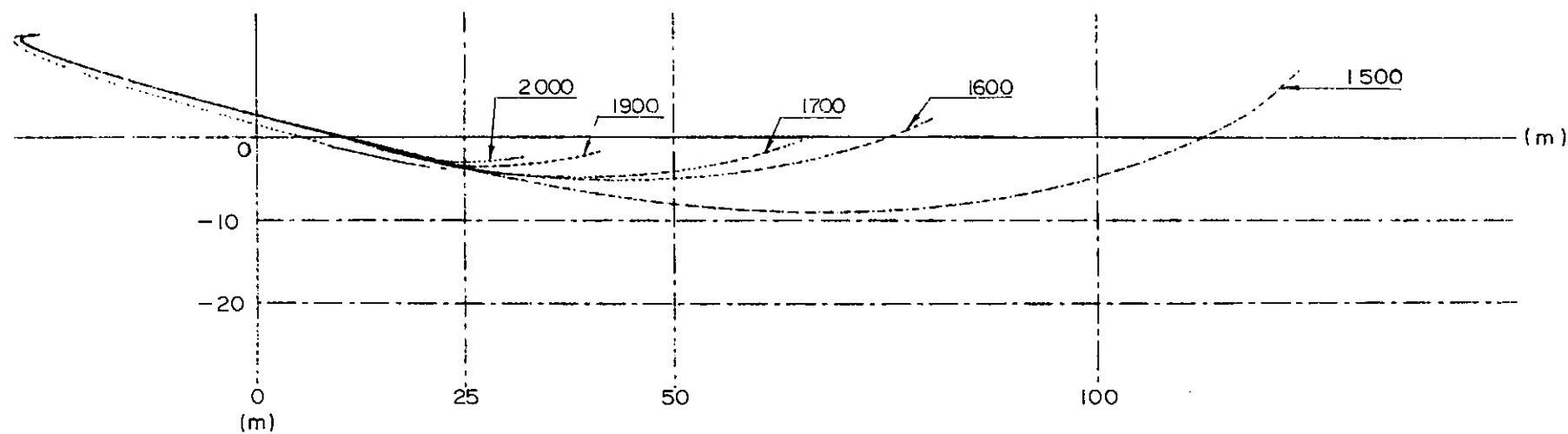
LANCAMENTO - ALFA = 3. COM INERCIA  $I_1$ , DRAG VARIÁVEL E BALSA FIXA  
 $I_1 = 600\ 000$

FIG. VI - 11



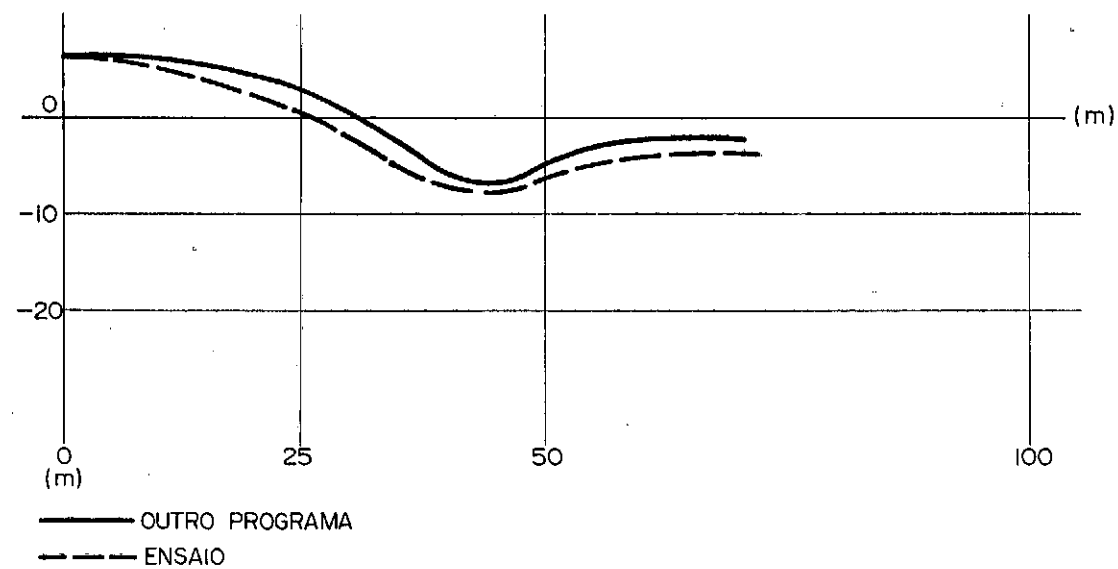
LANCAMENTO - ALFA = 6, INERCIA  $I_1$  E COM DRAG VARIÁVEL  
 $I_1 = 600\,000$

FIG. VI - 12



LANCAMENTO -  $\alpha = 6$ , INERCIA  $I_1$  E COM DRAG VARIÁVEL  
 $I_1 = 600\,000$

FIG. VI - 13



TRAJETÓRIA DE LANÇAMENTO DA JAQUETA PCR-1

TABELA VI.1

ÂNGULO DE LANÇAMENTO (°)	COEFICIENTE DE ARRASTO	INÉRCIA DA JAQUETA	COEFICIENTE DE ATRITO	BALSA FIXA	BALSA MÓVEL
3/5/6	800	600,000	0,10	X	
3	1500	600,000	0,10	X	
3/5/6	2000	600,000	0,10	X	
3	800	600,000	0,03	X	
3	800	600,000	0,05	X	
6	800	600,000	0,20	X	
6	2000	600,000	0,20	X	
3/3,5/4/5	1500	600,000	0,10		X
3/3,5/4/5	1500	600,000	0,10		X
3/3,5/4/5	2000	600,000	0,10		X
2/2,5/3/4	1000	600,000	0,10		X
5/6/7/8	2000	600,000	0,10		X
4	1500	600,000	0,10		X
4	1500	500,000	0,10		X
4	1500	400,000	0,10		X
4	1500	300,000	0,10		X
4	1500	200,000	0,10		X
6	2000	600,000	0,10		X
6	1900	600,000	0,10		X
6	1800	600,000	0,10		X
6	1700	600,000	0,10		X
6	1600	600,000	0,10		X
6	1500	600,000	0,10		X
3	1000	600,000	0,10	X	
3	1500	600,000	0,10	X	
3	2000	600,000	0,10	X	
3	2500	600,000	0,10	X	
3	3000	600,000	0,10	X	
8	1850	600,000	0,10		X
8	1950	600,000	0,10		X
8	1970	600,000	0,10		X
8	1900	600,000	0,10		X
8	2000	600,000	0,10		X

### VI.3 - Comparação de Resultados

Analisando todas as rodadas e resultados dos casos citados no ponto VI.2, podemos destacar os seguintes pontos principais:

- i ) A profundidade e distância alcançada diminui a medida que o arrasto aumenta, provocando um amortecimento da trajetória.
- ii) O mesmo efeito do item i) se deteta quando varia o ângulo de lançamento, ou seja a trajetória é mais amortecida quando o ângulo diminui.
- iv) Analogamente ao efeito do item i) acontece com a variação do atrito, se bem que esta influência aparentemente é pequena.
- v ) A variação da inércia rotacional da jaqueta provoca o mesmo efeito de amortecimento, a medida que diminui, mais amortece a trajetória.
- vi) A influência do movimento da balsa, provoca também um amortecimento da trajetória.

### VI.4 - Comparação com Resultados Produzidos por Outros

Comparando os resultados da análise simplificada com resultados produzidos por outros para a mesma jaqueta, constatamos que as formas das curvas são similares, porém, existe maior amortecimento nos resultados produzidos por terceiros. Este fato deve-se principalmente a que neste último resultado, o modelo da jaqueta está representado por todas as barras, nós e massas associadas e distribuídas em cada elemento, bem como

o arrasto de cada uma, o que permite um efeito de amortecimento mais representativo do fenômeno físico.

Outra influência importante é o movimento relativo entre balsa e jaqueta que amortece a trajetória.

O resultado do programa simplificado está do lado conservativo da solução, e permite avaliar no primeiro estágio do projeto, como a estrutura se comportará nesta fase da instalação.

#### VI.5 - Comparação com Resultados Experimentais

Analogamente ao item anterior, a comparação com resultados experimentais da mesma jaqueta, fornece resultados conservativos e mais amortecidos que os valores experimentais.

Constata-se que a ordem de precedência das curvas é a curva de resultados produzidos por outros com a mais amortecida, segue a curva dos resultados experimentais e finalmente as curvas do modelo simplificado.

## CAPÍTULO VII

## VII - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

VII.1 - Resumo dos Resultados

Para o estudo de lançamento são necessários normalmente métodos e modelos que levem em conta a variação no tempo do fenômeno físico bem como as não linearidades do arrasto.

Estas análises e modelos são com muitos complexos e envolvem muito tempo de computador e de engenharia.

Para analisar o lançamento foi procurado um modelo alternativo simplificado que permitisse obter conclusões válidas com um mínimo de esforço e tempo, usando a 2ª lei de Newton ou da conservação do momento e desenvolvendo as equações do movimento nessas bases teóricas.

O objetivo fundamental deste trabalho foi desenvolver uma teoria matemática que permita resolver no primeiro estágio do projeto o problema dinâmico do lançamento dado que envolve dois corpos em movimento e quatro equações diferenciais de 2ª ordem.

Para tal efeito foram escolhidas certas hipóteses básicas simplificadoras que permitam testar o comportamento do modelo numérico proposto, comparando os resultados obtidos para um caso real com resultados produzidos por outros e resultados experimentais.

Tal como apresentado nas comparações dos resultados, verificamos que a influência do amortecimento no movimento é fundamental para a trajetória do lançamento e consequentemente com o afundamento máximo alcançado.



Dependendo da estimativa do arrasto no primeiro estágio do projeto, é que a curva será mais ou menos amortecida e portanto mais ou menos conservativa, sendo a relação amortecimento conservativa do tipo inversa, ou seja quanto mais amortecida a curva, menos conservativa será a solução.

Ainda que a estimativa do arrasto seja a mais próxima do valor real, incide sobre a forma da curva o modelo simplificado utilizado que não considera a distribuição das massas, do arrasto e do volume por sobre a jaqueta toda o que provocará uma modificação do movimento.

Outra consideração importante diz respeito da influência do movimento da balsa na trajetória do lançamento da jaqueta, diminuindo o afundamento e a distância total alcançada quando considerado o movimento da barçaça.

Outros aspectos que foram detectados de quando se realizavam as rodadas de computador, diz respeito à sensibilidade de parâmetros tais como: atrito estático e dinâmico, a força do guincho atuante no início do movimento e o intervalo do tempo de integração das equações do movimento, que provocam distorções na trajetória e nos resultados finais do lançamento.

Em resumo pode-se concluir que:

- a) Ainda considerando o caso da balsa fixa e obtido um valor bastante razoável no que diz respeito ao afundamento máximo da jaqueta. Isto permite utilizar o programa para numa primeira fase, determinar se a jaqueta poderá tocar o fundo, com um mínimo de esforço computacional.
- b) Quando se inclui, ainda que de uma maneira muito simplificada, o movimento de balsa, obtem-se uma muito melhor aproximação.

mação da trajetória da jaqueta. Isso indica a importância da introdução de uma modelagem adequada do movimento de balsa, nos programas mais avançados para análise de lançamento.

Porém o objetivo do trabalho foi alcançado já que podemos dizer que a teoria matemática é satisfatória, bem como o modelo numérico utilizado que permite no primeiro estágio do projeto, estimar a trajetória do lançamento do lado conservativo, otimizando posteriormente a estrutura inicial.

Adicionalmente achamos ter contribuído a complementar a literatura existente dando mais um passo para incentivar futuros complementos e desenvolvimentos a este respeito.

## VII.2 - Orientação para Pesquisas Futuras

O maior interesse em desenvolver o modelo apresentado foi de obter uma maneira simples e rápida de saber se um anteprojeto de uma plataforma atende os requisitos da fase de lançamento além de fornecer as ferramentas e métodos básicos para, futuramente elaborar um programa de computador sofisticado que considere todos os parâmetros sem simplificações.

Desta maneira seria interessante pesquisar no modelo numérico desenvolvido outros métodos alternativos de integração, bem como a influência da variação de cada parâmetro no comportamento dinâmico da estrutura e na trajetória.

Continuando com este desenvolvimento finalmente a complementação do presente trabalho seria elaborar um programa de computador sem simplificações e compará-lo com programas comerciais ou de projetos, bem como com resultados experimentais.

## BIBLIOGRAFIA

- | 1 | - CHENG-HENG LU, DANIEL VESICEK, FRANK SHIH-FAI CHOV, GRAHAM BLIGHT (Brown and Root) (AMOCO), May 79, (Brown and Root)  
- "Launch and Flotation Analysis of Offshore Structures"  
- Petroleum Engineer International, May, June 79.
- | 2 | - J.P.CONSTOCK, Ed., ANDREWS HARRISON B. - "Launching Principles of Naval Architecture" - SNAME, 1967, pp. 752-781.
- | 3 | - J.P.HOOFT - "A Mathematical Method of Determining Hydrodynamically Induced Forces on a Semi Submersible" - Transactions of Naval Architects and Marine Eng., November 11, 12, 1971.
- | 4 | - SELOS PROGRAM - "Mc Auto Offshore Dynamic Launch Analysis".
- | 5 | - SYNGE & GRIFFITH - "Principles of Mechanics".
- | 6 | - ELLWANGER, G.B.(COPPE/UFRJ), RODRÍGUEZ, S.G.H.(PETROBRÁS), FERRANTE, A.J.(COPPE/UFRJ) - "Modelo para o Estudo de Flutuação de Estruturas Offshore Fixas na Fase de Lançamento" - III Simpósio sobre Sistemas Computacionais para Engenharia Civil e I Congresso Latino-Americano sobre Métodos Computacionais para Engenharia, Anais, Dez. 1979.
- | 7 | - LAUNCHING AND UPENDING - "The Installation of Jacket Platforms" - W.C. de Boom Netherlands Ship Model Basin the Netherlands.
- | 8 | - JAQUETA PCR-1 - "Ensaio de Lançamento em Modelo Reduzido" - Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT.

- | 9 | - API-RP-2A - "Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms" - Twelfth Edition, January 1981.
- | 10 | - DET NORSKE VERITAS - "Rules for the Design and Inspection of Offshore Structures" - 1977.
- | 11 | - FERRANTE, A.J., BREBBIA, C.A. - "Computational Methods for the Solution of Engineering Problems" - Pentech Press Limited, 1978.
- | 12 | - ELLWANGER, G.B., FERRANTE, A.J. - "Manual do Usuário do Módulo de Hidrostática do Programa STRUDL".

ANEXO 1  
PLATAFORMA DE PRODUÇÃO PCR-1  
ÁREAS SECCIONAIS

